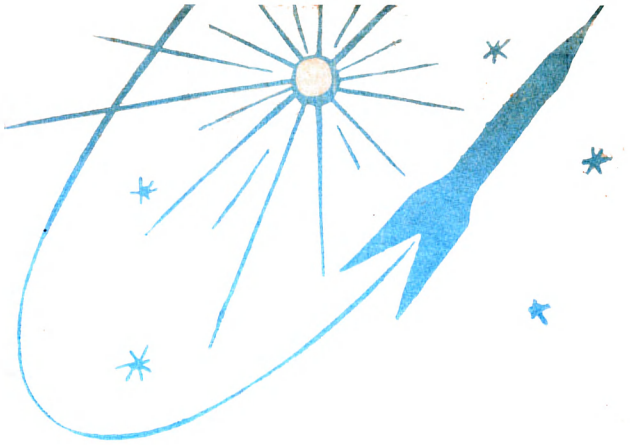
Дитяча енциклопедія
3



В науці немає широкого стовпового шляху, і тільки той може досягти її сяючих вершин, хто, не боячись втоми, карабкається по її каменистих стежках.

Карл Маркс

Провідне місце у природознавстві займають фізичні науки, від успішного розвитку яких залежить рух вперед суміжних наук і народного господарства. Дальші перспективи технічного прогресу визначаються тепер насамперед досягненнями основних напрямів фізичної науки. Зусилля радянських фізиків будуть сконцентровані на розробці проблем космічного проміння, ядерних реакцій, напівпровідників.

Велике теоретичне і практичне значення для розвитку багатьох галузей науки і практики мають роботи з математики. Зокрема, успіхи обчислювальної математики мають безпосередній зв'язок з розвитком автоматики.

У галузі хімічних наук найважливішим завданням є всемірне розширення теоретичних досліджень, що сприяють розробленню нових удосконалених технологічних процесів і створенню синтетичних матеріалів з властивостями, які задовольняють запити сучасної техніки.

(З Контрольних цифр розвитку народного господарства СРСР на 1959—1965 роки, затверджених XXI з'їздом КПРС)

ПЕРЕКЛАД
З ВИДАННЯ
АКАДЕМІЇ
ПЕДАГОГІЧНИХ
НАУК
РРФСР

★

Київ
1962

Дитяча енциклопедія

ДЛЯ СЕРЕДНЬОГО І СТАРШОГО ВІКУ

ТОМ 3

ЧИСЛА І ФІГУРИ ~ РЕЧОВИНА І ЕНЕРГІЯ

Державне
учбово-педагогічне видавництво
«Радянська школа»

03
Д 90

ГОЛОВНА РЕДАКЦІЯ

Д. Д. БЛАГОЙ, В. О. ВАРСАНОФ'ЄВА, Б. О. ВОРОНЦОВ-ВЕЛЬЯМІНОВ, П. О. ГЕНКЕЛЬ, М. К. ГОНЧАРОВ, Д. А. ЕПШТЕЙН, О. В. ЄФІМОВ, І. А. КАЇРОВ, О. Г. КАЛАШНИКОВ, Л. А. КАССІЛЬ, О. М. ЛЕОНТЬЄВ, О. Р. ЛУРІЯ, А. А. МАРКОСЯН О. І. МАРКУШЕВИЧ (головний редактор), С. Я. МАРШАК, В. Ф. НАТАЛІ, М. В. НЄЧКІНА, С. В. ОБРАЗЦОВ, Б. П. ОРЛОВ, О. М. ПИСАРЖЕВСЬКИЙ, С. Д. СКАЗКІН, Ф. Д. СКАЗКІН, А. О. СМИРНОВ, В. І. СОБОЛЕВСЬКИЙ, О. І. СОЛОВЙОВ, Л. І. ТИМОФЄЄВ, Т. С. ХАЧАТУРОВ, Ю. В. ХОДАКОВ, К. І. ЧУКОВСЬКИЙ, В. М. ШАЦЬКА.

☆

НАУКОВІ РЕДАКТОРИ 3-го ТОМА

О. І. МАРКУШЕВИЧ, О. Г. КАЛАШНИКОВ, Ю. В. ХОДАКОВ

☆

ПЕРЕКЛАДАЧІ

В. П. БАЖАН, І. Я. ЛЕБЕДЄВ, К. К. ПАНЧУЛ,
Л. Й. СОКОЛОВСЬКИЙ

Зміст

ЧИСЛА І ФІГУРИ

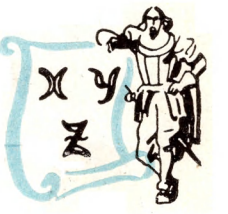
(*Математика*)

Кілька слів про математику. О. І. Маркушевич 21

ЧИСЛА

Як люди лічили за старих часів і як писали цифри. І. Г. Башмакова 25
Лічба двійками, трійками і дюжинами 26
Задача на зважування 27
Наша усна лічба 29
Лічба у первісних народів 30
Перші нумерації 33
Алфавітні нумерації. Псаміт 34
Позиційні системи 36

Найпростіші неозначені рівняння. В. І. Нечаєв 40
Піфагорові трикутники 40
Купівля квитка в метро і розмін полтиника 41
Зважування вантажу на шалькових терезах 41
Неозначені рівняння 42
Раціональні і цілі розв'язки неозначених рівнянь першого степеня. Метод розсіювання 42
Розв'язування задачі на зважування 43
Розв'язування задачі про купівлю квитка в метро і задачі про розмін полтиника 44
Неозначені системи рівнянь першого степеня 45
Раціональні розв'язки неозначених рівнянь степеня вище першого . . 46
Цілі розв'язки неозначених рівнянь степеня вище першого 47

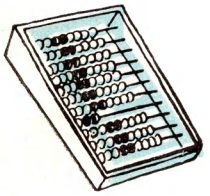


КУЛЬТУРА ЛІЧБИ І НАБЛИЖЕНІ ОБЧИСЛЕННЯ

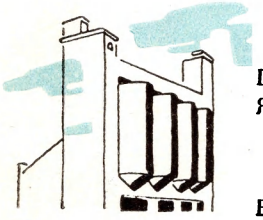
Чи добре ви лічите? П. Ю. Германович 49
Коли не слід користуватися шаблонними прийомами обчислень . . . 50
Чи вмієте ви міркувати? 51
Додавання «в думці» кількох двоцифрових чисел 53
Множення «в думці» двоцифрових чисел 53
Множення двох двоцифрових чисел, близьких до 100 53
Процентні обчислення 54
Окремі випадки піднесення чисел до квадрата 54
Висновок 54

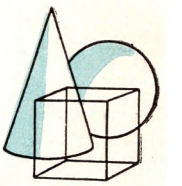
Лічильні пристрої. О. П. Доморяд. 55
Рахівниця і палички Непера 57
Логарифмічна лінійка 59
Множення і ділення 61
Піднесення до степеня і добування кореня 61
Лічильні машини 62

Електронні лічильні машини. М. Г. Рейнберг 66
Машини-моделі 66
Цифрові машини 68
Світ електричних імпульсів 70
Про двійкову арифметику 71
«Анатомія» цифрової машини 74
Чудові властивості цифрової машини 77
Цифрова машина працює 78
Висновок 81



ФІГУРИ І ТІЛА





Геометрія навколо нас. М. В. Потоцький 83
Як виникла геометрія. І. Г. Башмакова 89
Виникнення геометрії як науки 90
Побудова дедуктивної системи 92

Вимірювання довжин, площ і об'ємів. Н. Й. Польський 93
Вимірювання довжин 93
Вимірювання площ 95
Вимірювання об'ємів 99

Геометричні відображення. І. М. Яглом 100
Рухи і відображення подібності 101
Деякі складніші відображення 103
Відображення як основа класифікації теорем 106

Про різні геометрії. Н. Й. Польський 106
З чого починається виклад геометрії 106
Що таке аксіоми 108
Аксіома про паралельні 109
Спроби довести аксіому про паралельні 111
Чи дорівнює сума кутів трикутника 180° 111
Геометрія Лобачевського 114
Геометрія кривих поверхонь 114
Яка ж геометрія нашого світу 115
Висновок 117

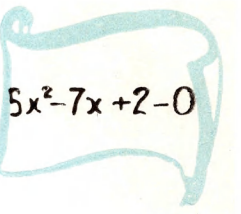
РІВНЯННЯ І ФУНКЦІЇ

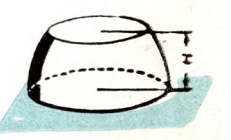
Як люди вчилися розв'язувати рівняння. І. Я. Депман 119
Метод двох хибних положень 120
Введення поняття невідомого числа 121
Квадратні рівняння 122
Рівняння степеня вище другого 123
Коли з'явилися терміни, що вживаються у вченні про рівняння . . 124

Що таке координати і для чого вони служать. М. В. Потоцький . . 124
Система координат 126
Побудова графіків 130
Рівняння ліній 130
Розв'язування важких геометричних задач з допомогою системи координат 133
Слимак Паскаля 138
Трисекція кута з допомогою слимака Паскаля 139

Функції у природі і техніці. Н. Я. Віленкін 141
Число *e*. Натуральні логарифми 141
Одна людина може вдержати корабель 141
Канат рівного опору на розрив 142
Радіоактивний розпад речовини 142
Вмикання і вимикання постійного струму 143
Остигання чайника 143
Чому парашутист падає рівномірно 144
Як вимірюють висоту за допомогою барометра 144
Скільки палива повинна взяти ракета 144
Гармонічні коливання 145
Коливання маятника 146
Розряджання конденсатора 146
Напруга змінного струму 146
Як з'єднати дві труби 146
Як вигинається колона 147
Загасаючі коливання 147
Вимушені коливання 148
Додавання коливань 148
Биття 149
Припливи і відливи 149
Модулювання коливань 150
Розкладання сили, що періодично змінюється, на гармонічні складові 150
Спектральний аналіз 151
Як машина відкрила теорему 151
Чому не працював трансатлантичний кабель 151
Радіоприймач і камертон 152
Висновок 152

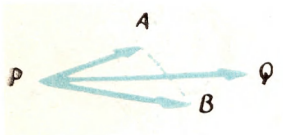
Інтеграл і похідна. В. Г. Болтянський і Н. Я. Віленкін . . 153
Задача Кеплера 153
Математика за чайним столом 153
Об'єм тіла 153
Промірювання ріки 154
В автомобілі 155
Робота паровоза 155
Інтеграл 156





Геометричне обчислення інтегралів 157
Інтегрування многочленів 158
Застосування інтегралів 159
Чудесна формула 160
Як виміряти швидкість польоту кулі 161
Швидкість радіоактивного розпаду 162
Чи вмієте ви проводити дотичну 163
Похідна 163
Похідні многочленів 164
Бджоли-математики 165
Як зробити найбільшу коробку 165
Балка найбільшої міцності 166
Формула Ньютона — Лейбніца 167
Похідні синуса і косинуса 168
Похідна показникової функції 169
Радіоактивний розпад 169
Показникова функція в природі і техніці 170
Левер'є та Адамс відкривають нову планету 170
Рівняння гармонічних коливань 171
Моделювання 172

АЛГЕБРА СКІНЧЕННОГО І НЕСКІНЧЕННОГО

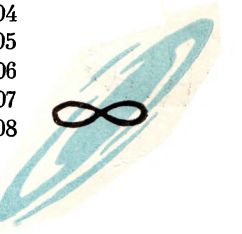


Геометрична алгебра. А. М. Лопшиць 173
Геометрія допомагає фізиці 173
Геометрія створює нову алгебру 177
Векторна алгебра на службі у геометрії 180

Числа і дії. В. Г. Болтянський 185
Чи багато потрібно чисел для розв'язування рівнянь 185
Потрібні нові числа 186
Збільшити вдвоє об'єм куба 187
Алгебраїчні і неалгебраїчні (трансцендентні) числа 189
Повний достаток чисел 189
Замість чотирьох дій — три 190
Над чим можна виконувати дії 191
Поняття групи 191
Приклади груп 192
Групи підстановок 194

Незвичайна арифметика. В. Г. Болтянський і Б. А. Кордемський 195
Арифметика остач 195
Чи можна розв'язати всі квадратні рівняння 198
Арифметика лишків допомагає звичайній арифметиці 198
Ознаки подільності 199
Теорема Ферма 200
Один секрет швидкої лічби 201

Поняття множини. П. С. Александров 202
Множини скінченні і нескінченні 202
Взаємно однозначна відповідність між двома множинами 204
Зчисленні множини 205
Множина всіх раціональних чисел зчисленна 206
Множина всіх дійсних чисел незчисленна 207
Потужність множини 208



ПЕРШЕ ЗНАЙОМСТВО З ТЕОРІЄЮ ІМОВІРНОСТЕЙ

Наука про випадкове. О. Я. Хінчин і А. М. Яглом 211
Чи існують закономірності випадкових явищ 212
Що називається імовірністю події 214
При розв'язуванні яких задач виникла теорія імовірностей 214
Які задачі розв'язували методами теорії імовірностей під час війни . 216
Кілька слів про історію розвитку теорії імовірностей 217
Які задачі розв'язують методами теорії імовірностей у наш час . . . 218
Теорія імовірностей і теорія інформації 219

ДОВІДКОВИЙ ВІДДІЛ

Що читати з математики. Ю. І. Сорокін 221
Покажчик імен і предметів. Ю. І. Сорокін 225
Умовні позначення і скорочення 232

РЕЧОВИНА І ЕНЕРГІЯ

(Фізика)

Місце фізики серед інших наук про природу. А. І. Китайгородський 235

МЕХАНІЧНІ ЯВИЩА

Основи механіки. Г. І. Покровський 241
Механічний рух, або переміщення 242
Рух може переходити з одних видів у інші 242
Швидкість 243
Швидкість — похідна шляху по часу 244
Приклади рухів, що мають різні швидкості 244
Швидкість — вектор 245
Додавання швидкостей 245
Прискорення. 246
Закон інерції 247
Сила — міра взаємодії 247
Сила, маса, прискорення 247
Одиниці сили і одиниці маси 248
Всесвітнє тяжіння 248
Приклад розрахунку сили 249
Дія сил на багатоступінчасту ракету 250
Додавання сил 251
Дія дорівнює протидії 252
Імпульс сили і кількість руху 252
Робота і енергія 253
Потужність 254
Закон збереження енергії 255
Закон збереження матерії 256
Швидкість світла — це гранична швидкість будь-якого руху 257
Звук і ультразвук. А. А. Коробко-Стефанов 258
Звук 258
Пружність повітря 258
Енергія звукової хвилі і сила звуку 261
Тон, висота, тембр і гучність звуку 262

Сприймання звуку органом слуху 263
Як пояснити нашу здатність визначати, звідки приходить звук . . . 263
Музичні тони і шуми 264
Запис звуків 265
Передача звуку на відстань 268
Нечутні «звуки» 270
Випромінювачі ультразвуку 271
Ультразвук у техніці і на виробництві 273

ПЛАВАННЯ І ЛІТАННЯ

Плавання тіл. С. З. Ушаков 277
Таємниця острова Пасхи. Люди на плоту. Тільки здогади 277
Як рідини зустрічають «гостей» 279
Спробуємо танцювати не від печі. Спогади, які не у всіх є. Рисунки-помічники 279
За допомогою славнозвісного голландця перемагаємо вищу математику. Розумний човняр 281
Пішохідні доріжки і легендарні оповідання. Архімед та його відкриття 282
Середня питома вага. Підводний човен. Автономний водолаз 284
«Стеля» і дно океану. «Підводні легені» і стальні шкаралупи 285
Уперте поліно. Центр тиску 287
Від поліна — до корабля. Центр тиску мандрує 287
Чи завжди існує виштовхувальна сила? Зіткнення з дном 288
Стеж за строгістю доведень. І надійний друг може підвести. Метацентр 288
Втішна виноградина і підіймання затонулих суден. Дороги через ріки 289
Водотоннажність і солоність морів 289
Катастрофа в Саутгемптоні. Академік Крилов. Коротко про наш флот. 290
Пастка для вітру 291
Гідростатика — це тільки одна вулиця «великого міста» фізики . . 292

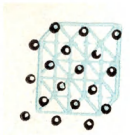
Літальні машини. С. М. Ільяшенко 292
Фізика польоту 293
Літаки. 301
Авіаційні двигуни 308
Устаткування літака приладами 312
Планери 314
Вертикально-злітаючі машини 315
Майбутнє авіації 317

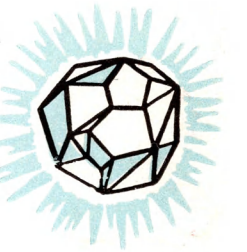
Радянські ракети і штучні супутники Землі. І. А. Мінасян 318
Міжконтинентальна балістична ракета 320
Дослідницькі ракети 321
Радянські супутники Землі 323
Що дали науці перші штучні супутники 323
Закони руху супутників 325
Конструкція і оснащення перших радянських супутників 328
Телеметрія 331
Траєкторія запуску та орбіти радянських супутників 332
Третій радянський супутник Землі 335
Радянська космічна ракета 339
Конструкція штучного супутника Сонця 342

Якими приладами була оснащена космічна ракета 343
Вивчення міжпланетного газу 344
Космічне проміння 345
Магнітні вимірювання 346
Метеорити 346
Як спостерігали за польотом ракети і підтримували з нею радіозв'язок. 347
Земля — Місяць 348
Проблеми майбутнього 349

БУДОВА РЕЧОВИНИ І РОБОТА ТЕПЛОВИХ МАШИН

Молекулярна будова речовини. А. І. Китайгородський 355
Атоми і молекули 357
Рух молекул 359
Як побудовані молекули 360
Як вимірюють молекули 362
Взаємодія молекул 363
Три стани речовини 364
Кристали 365
Будова кристалів 366
Порядок і безладдя в світі атомів 368
Молекули-гіганти 370
Чому скло крихке, а глина м'яка 371



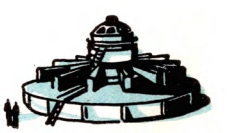


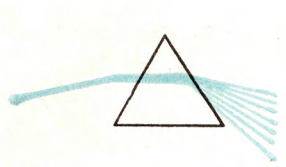
Подорож у світ температур і тисків. К. А. Гладков 373
Глибокий вакуум 373
Вище від атмосферного 374
Вогонь 376
Теплота і життя 377
На підступах до абсолютного нуля 380
Як затримати теплоту 383
Хімія високих температур 385
Дуже високі температури 387
Надвисокі температури 388

Фізичні принципи роботи теплових машин. І. Я. Конфедератов . . 390

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА

Електрика і магнетизм. Ю. Л. Клімантович і Г. Я. Мякішев . 403
Народження науки 404
Електричне поле 405
Речовини в електричному полі 409
Електричний струм у металах 411
Проходження електричного струму через гази 413
Електричний струм у рідинах 416
Магнітне поле 417
Магнітні властивості речовини 419
Електромагнітна індукція 422
Як добувають електричний струм 425
Змінний електричний струм 425
Перетворювач електричного струму 426
Теорія Максвелла 427



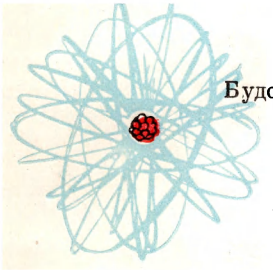


Світло і його застосування. А. А. Коробко-Стефанов 428
Прямолінійне поширення світла 428
Закон відбиття світла 430
Заломлення світла 431
Ньютон і Гюйгенс про природу світла 433
Перше вимірювання швидкості світла 434
Явище повного відбиття 436
Голуба оптика 437
Сприймання світла оком 437
Зорові труби 439
«Ночозорова» труба Ломоносова 440
Дзеркальний телескоп-рефлектор Ісаака Ньютона 440
Мікроскоп 441
Дисперсія світла 441
Інтерференція світла 443
Дифракція світла 444
Подвійне променезаломлення світла 445
Нова теорія світла 447
Шкала електромагнітних хвиль 448
Забарвлення тіл у природі 450
Джерела світла 451
Фотоефект 451
Хімія світла 452
Флуоресценція і фосфоресценція 453
Висновок 453

Фізичні основи радіо. І. А. Мінасян 453
Радіолампа і електрони 454
Що дав діод радіо 455
Електромагнітні коливання можна підсилити 457
Нові лампи — нові можливості 458
Чому на хвилю можна настроїтись 460
Приймач і передавач 462
Як поширюються радіохвилі 463
Іоносфера 465
Утворення іонів 466
Будова іоносфери 466
Полярні сяйва 467
Іоносфера і поширення радіохвиль 469
Сучасні радіолампи 470
Електронний промінь 474
Супергетеродинне приймання 475
Радіотелеграф і радіорелейні лінії 478
Нові види радіозв'язку 480
Радіоелектроніка 481

Напівпровідники. Г. Б. Анфілов 485
Провідники і ізолятори 485
Електрони в напівпровіднику 486
«Дірки» 487
Два типи напівпровідників 488
Термістори 489
Машини відчувають світло 490
Нагрівники і світильники 490
Запірний шар 491
Випрямлячі 491

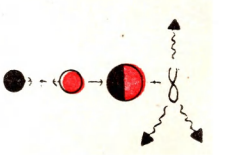
Кристали і лампи 492
Напівпровідниковий тріод 493
Надійність, мініатюрність 493
Майбутнє радіотехніки 494
Електроенергія з тепла 495
Застосування термоелектрогенераторів 495
Нові холодильники 496
Нагрівання разом з охолодженням 496
Вентильний фотоелемент 497
Світло працює 498
До сонячної енергетики 498
Напівпровідники і життя 499



ЯДЕРНА ЕНЕРГІЯ

Будова атома і атомна енергія. Б. І. Смагін 501
Найменші 502
Закон Менделєєва 503
Випадкове відкриття 503
В роботу включається подружжя Кюрі 504
Нові елементи 505
Промені в магнітному полі 507
Як розпізнали частинки 507
Закони розпаду 509
Три види променів 510
Розпадні ряди 510
Всередину атома 512
Пояснення Нільса Бора 513
Перетворення елементів 514
Удар по ядрах атомів 516
Незвичайні частинки 517
Будова ядра 518
Ядерні сили 519
Радіоактивність, викликана людиною 520
Як зняти шапку-невидимку 521
Столовий прибор 521
Туман допомагає бачити 522
Різноманітні методи 524
Кладові природи 527
Занадто багато нових елементів 527
Велике відкриття 528
Перший шлях до звільнення внутрішньоядерної енергії 529
Як грудка снігу 531
Ще один котел 533

Термоядерні реакції в природі і техніці. Г. Б. Анфілов 535
Ядерний синтез 535
У надрах Сонця 536
Воднева бомба 538
Майбутнє енергетики 539
Суть проблеми 540
Прямі трубки 541
Без електродів 542
Камери-бублики 543



Магнітна пастка 543
«Огра» 544
Співдружність учених 545
До термоядерних електростанцій 546
Вода — паливо майбутнього 547

ДОВІДКОВИЙ ВІДДІЛ

Що читати з фізики. Б. В. Ляпунов 549
Покажчик імен і предметів. Н. П. Суворов і А. А. Коробко-Стефанов 552

РЕЧОВИНА І ЕНЕРГІЯ

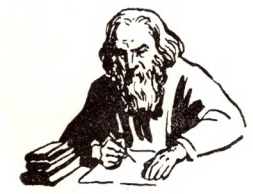
(Хімія)

Хімія та її роль у житті людей. Н. М. Емануель 561

ІСТОРІЯ ХІМІЇ

Як виникла хімія. С. С. Щербаков 565
Як хімія перетворилась в алхімію 566
Алхімія перетворюється в ятрохімію 570
Хімія стає наукою 571
Літопис хімії 574
Джерела хімічних знань 574
Зародження наукової хімії 574
Утвердження в хімії атомно-молекулярного вчення 575

АТОМИ — ЦЕГЛИНИ ВСЕСВІТУ



Періодичний закон Д. І. Менделєєва. І. В. Петрянов 577
Відкриття великого закону 577
Як був відкритий періодичний закон 578
Таємниця порожнього місця 580
Велике передбачення 581
Як справдилися передбачення Менделєєва 583
Велике випробування періодичного закону 584
Як радіоактивні елементи знайшли свої місця в таблиці Менделєєва. 586
Що є основою великого закону 589
Періодичний закон — закон будови атома 591
Чому в одному стовпці стоять поряд залізо, кобальт, нікель 592
Чому і як сполучаються між собою атоми 593
Періодична таблиця наших днів 594
Як були створені трансуранові елементи 595
Заглянемо в майбутнє 600
Періодичний закон і хімія Всесвіту 602
Хімія Землі 602
Хімія метеоритів 603
Хімія планет 604
Хімія Сонця 605
Міжзоряний простір 607
Хімія зірок 608

Як пізнаються хімічні елементи. С. Д. Бесков та І. Н. Селезньова. 610
Хімічний аналіз — важливий розділ хімії 610
Як виникла агрохімія 611
Хімічний аналіз на хімічних виробництвах 613
Аналіз «на полум'я» 614
Спектральний аналіз 614
Аналіз «на перл» 616
Хімічний аналіз «мокрим способом» 618

Метали. Ю. В. Ходаков 620
Скільки металів обслуговують нас 620
Як застосування металів пов'язано з їх властивостями 621
Сплави 622
Чим чавуни відрізняються від сталей 623
Які бувають чавуни 624
Як загартовують і відпускають сталь 626
Леговані сталі 626
У техніку приходять нові метали 627

ХІМІЧНА РЕАКЦІЯ

Хімічна взаємодія і каталіз. С. О. Балезін і В. І. Веденєєв . . 629
Види каталізу 630
Трохи історії 631
Особливості дії каталізаторів 632
Активатори каталізаторів 632
Яка роль каталізаторів у хімічній реакції 632
Як же діє каталізатор 634
Один з найвидатніших винаходів людського розуму 634
Живе чи неживе 636
Безполум'яне горіння 636
Що виражають хімічні рівняння 637

ХІМІЯ ЗМАГАЄТЬСЯ З ПРИРОДОЮ

Органічні речовини навколо нас. Ю. В. Ходаков 643
Як розпізнають органічні речовини 644
З чого складаються органічні речовини 644
Природні «фабрики» органічних речовин 645
Велике змагання вчених з природою 645
Сучасний хімік і його лабораторія 645
Як встановлюють склад молекул 647
Хімічне доміно 648
Світ, відбитий у дзеркалі 650
Хімік в ролі будівника 653

Полімери. К. А. Гладков 655
Молекули-гіганти 656
Родовід великих молекул 656
Перші штучні пластмаси 657

Секрет міцності 658
Як утворюються молекули-гіганти 658
«Швейна фабрика» для гігантських молекул 659
Поліконденсація 659
Полімеризація 661
Як добувають фторопласт. 662
Скло, шкіра чи гума? 663
І у вогні не горить 665
Майбутнє полімерів 667

З чого роблять одяг. Л. А. Цвєтков 667

З чого складається наша їжа. Л. А. Цвєтков 670
Штучне добування харчових продуктів. О. А. Реутов 676

Хімічні джерела сили. Ю. В. Ходаков 677

Як були створені штучні фарби і ароматичні речовини. О. А. Реутов. 680
Синтетичні запашні речовини 685

Хімія життя і здоров'я. Ю. В. Ходаков 686
Особливості діяння речовин на живий організм 686
Молекули проти мікробів 687
Від фарб до ліків 688
Снотворні ліки 689
Життєві каталізатори 690
На шляху до штучного створення життя 691

ДОВІДКОВИЙ ВІДДІЛ

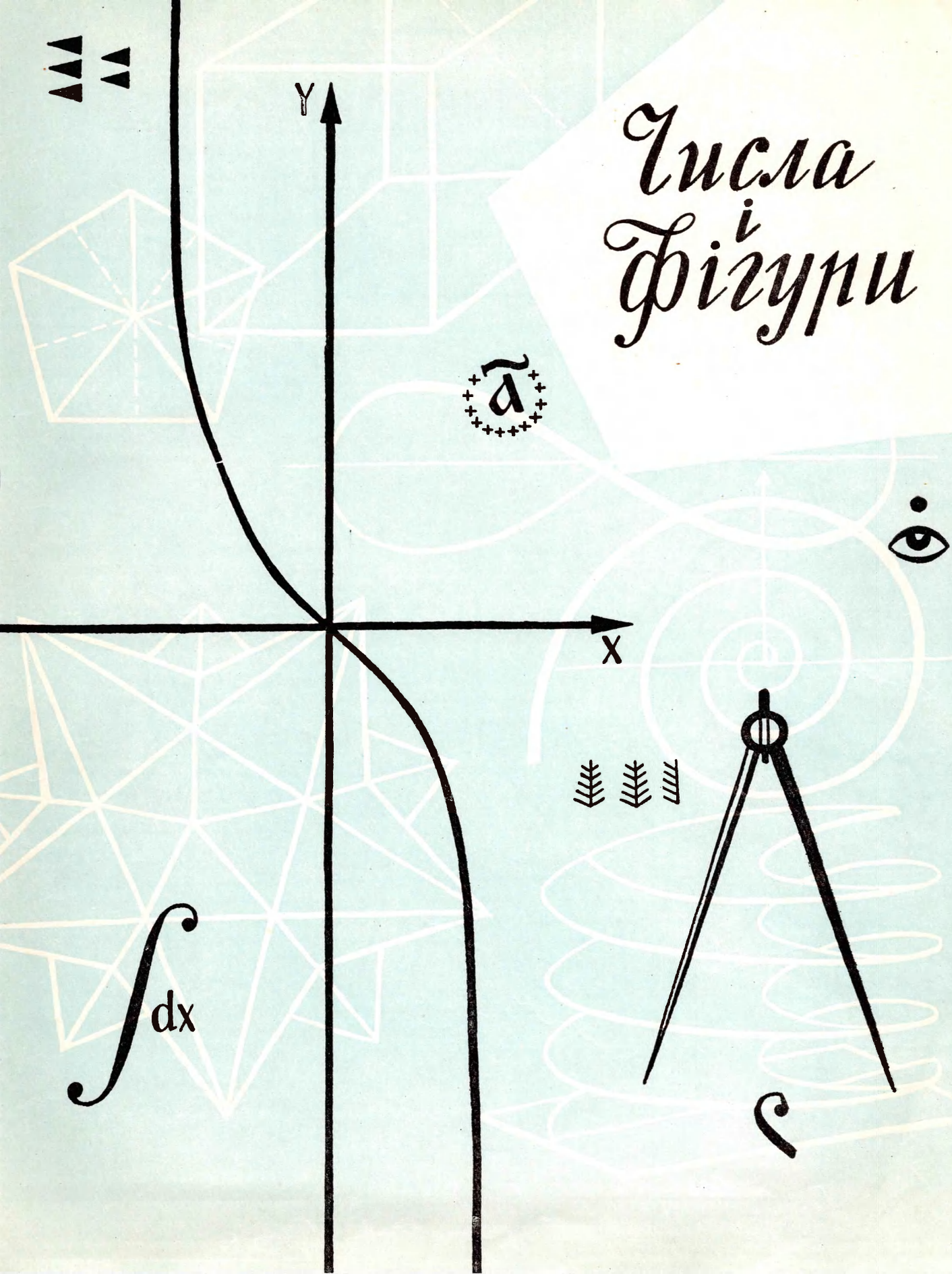
Що читати з хімії. С. Д. Давидов 695
Покажчик імен і предметів. Р. Н. Савельєва 698
Умовні позначення і скорочення 705

Ілюстрації і таблиці на окремих аркушах

Схеми математичного і фізичного моделювання *(художник В. М. Добровольський)* . . . . 72—73
Схема послідовності роботи електронної лічильної машини *(художник В. М. Добровольський)* »
Обробляючи результати спостережень за рухом супутника, електронні лічильні машини обчислюють його майбутню орбіту *(художник К. К. Соколов)* . . . . . »
Симетрія як приклад геометричного відображення *(художник А. А. Катковський)* . . . . 104—105
План і карта як приклад відображення *(художник А. В. Петров)* . . . . . »
Міри часу і довжини *(художник К. К. Арцеулов)* 256
Використання важелів і блоків у складних механізмах *(художник К. К. Арцеулов)* 257
Люди з аквалангами знайшли судно, яке затонуло 2000 років тому *(художник К. К. Соколов)* 288
Зовнішній вигляд і переріз підводного човна *(художник С. Г. Наумов)* 289
Аеродинамічна труба *(художник Л. С. Вендров)* 304
Різні види авіаційних двигунів *(художник Л. С. Вендров)* . . . . . 304—305
Гіперзвуковий літак найближчого майбутнього *(художник Г. В. Храпак)* 305
Старт багатоступінчастої ракети *(художник Н. І. Гришин)* 320
Можливий зовнішній вигляд населеного супутника *(художник Н. І. Гришин)* 321
Перші космічні мандрівники на Місяці *(художник Н. І. Гришин)* 336
Фотонна ракета *(художник Н. І. Гришин)* 337
Деякі кристалічні структури *(художник С. І. Каплан)* 368
Структури тіл, що не мають кристалічної будови *(художник С. І. Каплан)* 369
Речовина в умовах різних температур *(художник В. М. Добровольський)* 384
Речовина на шкалі температур і тисків *(художник В. М. Добровольський)* 385
Види електричних розрядів *(художник А. Н. Лебедєв)* 408
Різні види електричних машин і приладів *(художник А. Н. Лебедєв)* 409
Дисперсія світла *(художник Г. В. Храпак)* 440
Різні види інтерференції *(художник Б. А. Малишев)* 441
Тиск світла на хвіст комети. Дослід Лебедєва *(художник К. К. Арцеулов)* 448
Дисперсійні спектри. Стилоскоп *(художник Б. А. Малишев)* 449
Спектри електромагнітних коливань *(художник Ю. І. Зальцман)* 464
Схема будови земної атмосфери *(художник К. К. Арцеулов)* 465
Ряди радіоактивних елементів *(художник С. Н. Волков)* . . . . . 512—513
Ядерні реакції, що відбуваються в надрах Сонця *(художник Б. П. Киштимов)* 544
Магнітні поля, які зміцнюють плазмовий розряд *(художник Б. П. Киштимов)* 545
Лабораторія алхіміка *(художник В. І. Таубер)* 568
Ломоносов за виготовленням забарвлених стекол *(художник К. К. Арцеулов)* 569
Періодична система елементів Д. І. Менделєєва *(художник Р. Ж. Авотін)* 592
Початок періодичної таблиці атомних ядер *(художник Р. Ж. Авотін)* 593
Схеми будови атомів легких елементів *(художники С. Н. Баришникова і К. К. Соколов)* . . 600
Схеми різних форм хімічного зв'язку між атомами *(художники С. Н. Баришникова і К. К. Соколов)* 601

Діаграми розподілу металів у земній корі і в метеоритах *(художник М І. Улупов)* . . . 608
Цикл сонячних реакцій *(художник М. І. Улупов)* 609
Металеві добавки забарвлюють стекла в різні кольори *(художник А. А. Катковський)* . . 616
Деякі приклади аналізу «на перл» *(художник А. А. Катковський)* 617
Різні види каталізу *(художник С. Г. Наумов)* 640
«Заморожений радикал» *(художник С. Г. Наумов)* 641
Реакції добування синтетичного каучуку *(художник А. П. Бірюков)* 656
Молекули деяких органічних речовин і полімери, що утворюються з них *(художник А. П. Бірюков)* 657
Схема полімеризації термопластичної і термореактивної смол *(художник А. П. Бірюков)* . 658
Роль каталізатора при створенні полімерної молекули *(художник А. П. Бірюков)* 659
Схема добування фторопласта *(художник С. І. Каплан)* 660
Ланки молекул деяких важливих пластичних мас і виготовлені з них предмети *(художник С. І. Каплан)* 661
Вміст білків, жирів і вуглеводів у харчових продуктах *(художник Н. К. Вечканов)* . . . 680
Еволюція барвників *(художник С. К. Русаков)* 681
Дія адреналіну та його структурна формула *(художник А. П. Бірюков)* 688
Плазмохін і хінін з їх структурними формулами *(художник А. П. Бірюков)* 689

Числа і фігури



КІЛЬКА СЛІВ ПРО МАТЕМАТИКУ

Коли б спитати всіх школярів, який предмет подобається їм найбільше, то навряд чи більшість з них назве математику. Звичайно її скоріше поважають, ніж люблять. У нас в країні наукові знання у великій пошані, але, звичайно, і серед наших школярів є такі, які тяготяться вивченням математики. Очевидно, справа пояснюється тут не тільки тим, що її вивчення багатьом дається нелегко і потребує наполегливості та праці, а й тим, що деякі питання шкільної математики іноді здаються не досить цікавими і часом навіть нудними. Однак азбука і граматика якої-небудь мови часто також не дуже цікаві, а тим часом тільки через їх вивчення лежить шлях до всієї літератури з її захоплюючими казками, оповіданнями, повістями, романами і віршами. Подібно до цього через ті найпростіші, азбучні положення математики, які вивчаються в школі, лежить стовпова дорога до сучасної математики — величезної, майже неосяжної за своїм багатством галузі людського знання, яка знаходить з кожним роком дедалі більше застосування.

Дехто думає, що в математиці в основному все вже відомо, що часи відкриттів у цій науці давно минули, а тепер залишається тільки вивчати теореми, названі іменами вчених минулих віків, і застосовувати їх до розв'язання різних задач. Але в дійсності це далеко не так. Навіть більше того, саме зараз математика переживає період надзвичайно бурхливого розвитку, незважаючи на те, що народилася вона багато тисячоліть тому. Нові математичні від-

криття в наші дні здійснюються буквально щодня в усіх частинах світу. Щоб мати уявлення про кількість цих відкриттів, досить знати ось що. В Радянському Союзі видається щомісячний реферативний журнал «Математика», в якому убористим шрифтом друкуються дуже короткі повідомлення (реферати) про різні математичні відкриття, зроблені останнім часом в усьому світі. Так ось, комплект цього журналу за 1958 р. являє собою величезний том (понад 1600 сторінок великого формату!), що містить понад 9000 рефератів. Таке велике число математичних відкриттів, зроблених лише за один рік: в середньому по 30 відкриттів на день! Звичайно, не всі вони однаково важливі, але все-таки майже кожне з них означає просування науки вперед, нехай іноді навіть на зовсім маленький крок.

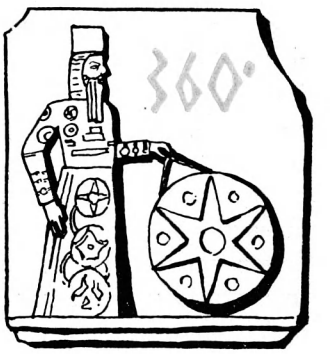
Такий бурхливий розвиток математики тісно пов'язаний з тим, що теорія і практика висувають дедалі нові задачі, які математика повинна розв'язувати. І ось, коли старих знань не вистачає, доводиться винаходити нові шляхи, шукати нові засоби, створювати нові методи. Нині математика застосовується не тільки в астрономії, механіці, фізиці, хімії і техніці, де вона застосовувалася і раніше, але також у біології, деяких галузях суспільних наук і навіть у мовознавстві. Особливо велике поле для її застосувань відкрилося у зв'язку з створенням швидкодіючих електронних обчислювальних машин. Вони завбачають погоду, обчислюють орбіти штучних супутників, перекладають наукові тексти з однієї мови на іншу.

Найближчим часом нові типи обчислювальних універсальних та спеціалізованих машин широко застосовуватимуться в найрізноманітніших галузях людської діяльності, в тому числі для керування виробничими процесами, для статистичного і бухгалтерського обліку, планових і проектних розрахунків.

Коротко математику можна схарактеризувати як науку про числа і фігури. Важко назвати таку галузь людської діяльності, де не доводилося б ставити і розв'язувати питання про кількість предметів, про їх розміри і форму. З давніх-давен, в міру розвитку людського суспільства, нагромаджувалося дедалі більше відомостей про числа, про розміри і форми різних предметів. З'явилась потреба упорядковувати ці відомості, щоб їх легше було передавати від одного покоління іншому. Так поступово зароджувалась математика.

Початками математичних знань люди володіли вже приблизно за чотири тисячі років до нашого часу. Про це свідчать єгипетські папіруси, клинописні вавілонські таблички, що дійшли до нас, де зустрічаються розв'язання різних арифметичних, геометричних і алгебраїчних задач.

Великого розквіту математика досягла в Стародавній Греції. Більш як за 300 років до н. е. тут з'явилися «Начала» Евкліда — твір, у якому систематично викладалась геометрія в тому приблизно обсязі, в якому вона тепер вивчається в середній школі, а також давалися відомості про подільність чисел і про розв'язання квадратних рівнянь (в геометричній формі). В III ст. до н. е. Архімед винайшов спосіб визначення площ, об'ємів і центрів ваги різних простих фігур. Наприкінці III ст. до н. е. Аполлоній написав книгу про властивості деяких цікавих кривих — еліпса, гіперболи і параболи. Коли до цього додати ще, що в II ст. н. е. Птолемей



в астрономічному творі, відомому під арабською назвою «Альмагест», виклав основи тригонометрії, дав таблиці синусів (вірніше, довжин хорд кола) і способи розв'язування сферичних трикутників (тобто трикутників, сторонами яких є дуги великих кіл, проведених на кулі), то стане зрозумілим, який великий вклад у розвиток математичних знань внесли стародавні греки за багато століть до нашого часу. Можна сміливо твердити, що нинішні школярі набувають за час перебування в середній школі лише невелику частину цих знань (правда, вони дістають також деякі відомості, яких стародавні греки не мали).

Але, звичайно, розвиток науки на цьому не зупинився. Працями китайських, індійських, арабських учених математика продовжувала розвиватися (особливо великих успіхів домоглися індійці та араби в розвитку алгебри і тригонометрії). Вченим Західної Європи після тривалого застою в розвитку науки в часи середньовіччя довелося затратити чимало зусиль, щоб засвоїти праці своїх попередників. Лише після цього вони змогли просуватися вперед самостійно. Розквіт математики в Європі починається з XVII ст. У цей час зароджуються нові галузі математики, які належать до так званої вищої математики і вивчаються нині у вищих учбових закладах. Особливо глибоко вища математика вивчається на фізико-математичних факультетах університетів та педагогічних інститутів, деякі її розділи проходять у вищих технічних учбових закладах.

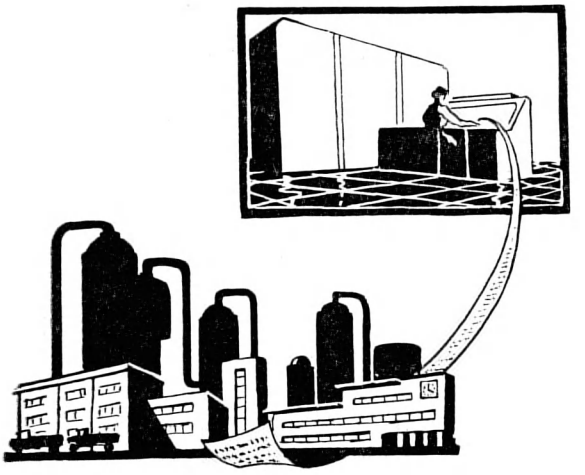
Основу вищої математики становлять аналітична геометрія та диференціальне і інтегральне числення. Їх створення, зв'язане з іменами великих учених XVII ст. — Декарта, Ферма, Ньютона і Лейбніца, — дозволило математично вивчати рух, процеси зміни величин і геометричних фігур. Разом з тим до математики ввійшли координати, змінні величини і поняття функції. З поняттям координат, змінними величинами і поняттям функції школярі знайомляться в курсі алгебри і тригонометрії. Але при цьому вони залишаються лише біля порога тієї вищої математики, яка протягом останніх трьохсот років проявила себе як незамінний інструмент винятковой сили і тонкості, що дає змогу поколінням астрономів, фізиків, механіків та представників інших галузей знання вирішувати найважчі проблеми природознавства і техніки.

Неможливо простежити тут, хоча б і побіжно, успіхи математиків за останні століття. Відзначимо великий вклад, який внесли російські вчені М. І. Лобачевський, П. Л. Чебишев і радянські математики. Можна сказати, що сучасна математика досягла такого ступеня розвитку і має такий багатий зміст, що одній людині, навіть найбільш ученій, не можна охопити її всю і доводиться спеціалізуватися в якій-небудь певній її галузі.

Треба зауважити, що сучасна математика складається не тільки з «алгебри» і «геометрії», як шкільний курс; тепер налічується к і л ь к а д е с я т к і в різних галузей математики, кожна з яких має свій особливий зміст, свої методи і галузі застосування.

В розділі тома, присвяченому математиці і названому «Числа і фігури», ми вмістили кілька статей, що тісно пов'язані з шкільним курсом математики, доповнюють і поглиблюють ті знання, які читач уже має. Але ми вважали за необхідне також підняти завісу, яка відділяє «елементарну», шкільну математику від математики «вищої».

Ми розуміємо, що деякі з наших статей не можна назвати простими і легкодоступними. Ми радимо при читанні таких статей озброї-



тися терпінням, а також папером і олівцем і долати їх крок за кроком. Якщо читач і тут зазнає невдачі — впадати у відчай не слід. Можна пригадати слова, з якими визначний французький математик Лагранж звертався до молодих математиків: «Читайте, розуміння прийде потім».

У всякому разі ми сподіваємося, що кожний молодий любитель математики знайде в книзі такі статті, які будуть йому відразу ж доступні. Щодо інших, то до них можна повернутися пізніше, коли читач просунеться вперед у шкільному курсі. Одне слово, «розуміння прийде»!

Числа

ЯК ЛЮДИ ЛІЧИЛИ ЗА СТАРИХ ЧАСІВ І ЯК ПИСАЛИ ЦИФРИ

У сі числа ми звикли записувати з допомогою десяти знаків-цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Наприклад, число, яке складається з чотирьох сотень, чотирьох десятків і чотирьох одиниць, ми записуємо так: 444. При цьому один і той же знак «4» позначає відповідне число одиниць, якщо він стоїть на останньому місці, число десятків — якщо на передостанньому, і число десятків десятків, тобто сотень, — якщо він стоїть на третьому місці від кінця. Такий принцип запису чисел називається **позиційним**, або **помісним**, бо числове значення кожної цифри залежить не тільки від її начертання, а й від того, на якому місці вона стоїть при запису числа. Позиційний принцип дозволяє з допомогою десятьох знаків-цифр записати яке завгодно велике число. Справді, нехай нам дано ціле число N. Для того щоб записати його в нашій системі, знаходимо спочатку остачу від ділення N на 10, потім остачу від ділення частки на 10 і т. д. доти, поки як частку не дістанемо числа, меншого від десяти. Наприклад:

$$N = 523 = 10 \cdot 52 + 3$$
$$52 = 10 \cdot 5 + 2$$
$$5 = 10 \cdot 0 + 5$$

Знайдені остачі і є послідовними цифрами нашого числа, записаного в позиційній десятковій системі:

$$N = 523,$$

або, докладніше,

$$N = 5 \cdot 10^2 + 2 \cdot 10 + 3.$$

Для тих, хто обізнаний з алгеброю, скажемо, що кожне число M можна подати в такому ж вигляді.

Якщо $10^n \leqslant M < 10^{n+1}$, то

$$M = a_n 10^n + a_{n-1} 10^{n-1} + \ldots + a_1 10 + a_0,$$

де кожен з коефіцієнтів a_0, $a_1, \ldots, a_n$ менший від 10 (це просто остачі від послідовного ділення числа M на 10). Отже, кожен з коефіцієнтів ми запишемо з допомогою однієї з наших десяти цифр. Йдучи за десятковим позиційним принципом, ми записуємо число M так:

$$a_n a_{n-1} \ldots a_1 a_0,$$

де a_0 означає число звичайних одиниць, або одиниць першого розряду, які містить M; a_1 — число одиниць другого розряду, тобто десятків; a_2 — число одиниць третього розряду, тобто сотень, і т. д.

Число 10 називається основою нашої системи.

Отже, для запису чисел ми користуємося десятковою позиційною системою числення.

ЛІЧБА ДВІЙКАМИ, ТРІЙКАМИ І ДЮЖИНАМИ

Однак зовсім не обов'язково лічити десятками. Можна, наприклад, лічити двійками або трійками. Для цього за основу системи числення приймемо число 2 або 3, а в усьому іншому будемо робити так само, як тоді, коли основа дорівнювала десяти.

Для запису за двійковою системою нам потрібні лише дві цифри: 0 і 1. Число «два» ми запишемо в цій системі як 10. А щоб не сплутати наш запис із звичайним, будемо справа внизу ставити маленьку цифру 2 — це означатиме, що основою системи є число «два». Отже, 10_2 буде записом числа 2. Число $3 = 1 \cdot 2 + 1$, тобто його записом буде 11_2.

Число $4 = 2^2 + 0 \cdot 2 + 0 \cdot 1$, тобто воно запишеться у вигляді 100_2. Записом числа 5 буде 101_2, а числа 7 — 111_2.

Щоб знайти запис будь-якого числа N, треба визначити остачі від послідовного ділення цього числа на 2. Ми радимо читачам перевірити, що записом числа 35 у двійковій системі буде 100011_2.

Якщо число N таке, що

$$2^n \leqslant N < 2^{n+1},$$

то, ділячи його послідовно на 2, дістанемо:

$$N = a_n 2^n + a_{n-1} 2^{n-1} + \ldots + a_1 2 + a_0,$$

тобто запис цього числа в двійковій системі матиме вигляд

$$a_n a_{n-1} \ldots a_1 a_0,$$

але тут уже кожен з коефіцієнтів може набувати тільки двох значень: 0 або 1.

Докладніше про двійкову систему, яка зараз набула великого значення у зв'язку з її застосуванням у швидкодіючих обчислювальних машинах, ви дізнаєтесь, якщо прочитаєте статтю «Електронні лічильні машини», вміщену в цьому ж томі Дитячої енциклопедії. А ми тепер перейдемо до систем з іншими основами.

Для запису числа в трійковій системі потрібні три цифри, наприклад 0, 1, 2. Число «три» тут записуватиметься як 10_3, а «чотири» — як 11_3. Записом числа 35 в цій системі буде 1022_3.

Подамо таблиці додавання і множення чисел, записаних за трійковою системою:

Таблиця додавання

	1	2
1	2_3	10_3
2	10_3	11_3

Таблиця множення

	1	2
1	1_3	2_3
2	2_3	11_3

Але можна лічити і дюжинами, тобто користуватися системою числення з основою дванадцять. Ще не так давно в Росії і в Західній Європі деякі предмети, наприклад пера та олівці, прийнято було лічити дюжинами. Сервізи також звичайно складають з 12 чашок, 12 блюдець, 12 тарілок, а комплекти меблів — з 12 стільців або крісел. Існувала навіть спеціальна назва для дюжини дюжин — грос.

Поглянемо, як зображуватимуться числа в цій системі. По-перше, в ній повинно бути 12 цифр. Отже, до наших десяти цифр треба додати ще дві, наприклад A для позначення десяти і $Б$ — для одинадцяти. По-друге, запис чисел у ній буде коротший, ніж у нашій системі, а таблиця множення довша. Число 12 запишеться як 10_{12} (ми знову ставимо значок 12 для того, щоб знати, в якій системі зроблено запис), число 13 — як 11_{12}, число $35 = 2 \cdot 12 +$

$+11$ — як $2Б_{12}$, а число $133 = 11 \cdot 12 + 1$ — як $Б1_{12}$, тобто воно стане двоцифровим. Подамо таблицю множення чисел, записаних у цій системі[1].

	2	3	4	5	6	7	8	9	*А*	*Б*
2	4	6	8	*А*	10	12	14	16	18	1*А*
3	6	9	10	13	16	19	20	23	26	29
4	8	10	14	18	20	24	28	30	34	38
5	*А*	13	18	21	26	2*Б*	34	39	42	47
6	10	16	20	26	30	36	40	46	50	56
7	12	19	24	2*Б*	36	41	48	53	5*А*	65
8	14	20	28	34	40	48	54	60	68	74
9	16	23	30	39	46	53	60	69	76	83
А	18	26	34	42	50	5*А*	68	76	84	92
Б	1*А*	29	38	47	56	65	74	83	92	*А*1

Дванадцяткова система числення колись досить широко застосовувалась. Про це свідчать такі факти: ми досі ділимо рік на 12 місяців, а добу—на 24 години, причому в повсякденному житті години ми лічимо тільки до 12, а потім починаємо лічбу спочатку (перша година дня, друга година дня і т. д.). Число 12 часто зустрічається також в казках і легендах (дванадцятиголовий змій, дванадцять братів-розбійників), що також свідчить про стародавнє походження дванадцяткової системи числення.

Деякі вчені вважали, що така система була б зручніша, ніж десяткова, бо число 12 має більше дільників, ніж число 10. Насправді ж це не дає ніяких особливих переваг.

Нижче ми розповімо про те, що колись існували нумерації з основою 20 і навіть 60.

А тепер зробимо деякі загальні висновки:

1) всяке число, відмінне від одиниці, може бути основою позиційної системи числення;

2) в системі числення повинно бути стільки цифр, скільки одиниць є в основі системи.

Незважаючи на те, що принципіально всі позиційні системи числення рівноправні, в різних випадках зручніше користуватися різними системами. Наприклад, як ми вже говорили, при лічбі на електронних машинах в основному користуються двійковою системою.

Зараз ми подамо кілька задач, для розв'язання яких зручніше буде скористатися не десятковою системою числення, а іншими.

[1] Записуючи цю таблицю, ми випускаємо значок 12. Але не треба забувати, що всі числа записані в дванадцятковій системі.

ЗАДАЧА НА ЗВАЖУВАННЯ

Ось одна з класичних задач, розв'язати яку можна відразу ж, якщо вибрати систему числення з відповідною основою. Ця задача наведена в математичній книзі видатного математика XIII ст. Леонардо Пізанського. Нею цікавився також великий Ейлер.

Потрібно вибрати 5 гир так, щоб з їх допомогою можна було зважити будь-який вантаж до 30 *кГ* при умові, що гирі ставлять тільки на о д н у шальку терезів.

Які ж гирі треба вибрати?

Сума ваги всіх гир повинна бути не менше 30 *кГ*. Але, звичайно, цього далеко не досить. Якщо ми виберемо, наприклад, гирі вагою в 1 *кГ*, 2 *кГ*, 3 *кГ*, 10 *кГ* і 15 *кГ*, то з їх допомогою не можна буде зважити вантажі в 7 *кГ*, 8 *кГ*, 9 *кГ*, 22 *кГ*, 23 *кГ* і 24 *кГ*.

Розберемо, який математичний смисл має задача. Щоб зважити деякий вантаж, ставлячи гирі тільки на одну шальку терезів, треба подати його вагу у вигляді суми ваг наявних гир, беручи кожну гирю не більше одного разу. Якщо вибрані нами гирі мають вагу p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, то вантаж вагою $Q \leqslant 30$ *кГ* треба подати так:

$$Q = a_1p_1 + a_2p_2 + a_3p_3 + a_4p_4 + a_5p_5,$$

де кожний коефіцієнт дорівнює одиниці, якщо ми кладемо відповідну гирю на шальку тере-

Леонардо Пізанський.

зів, і нулеві, якщо ми нею не користуємося при зважуванні.

При такій постановці питання видно схожість з поданням числа Q у двійковій системі числення. Треба тільки як p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 взяти гирі вагою:

$$p_1 = 1\ кГ,\ \ p_2 = 2\ кГ,\ \ p_3 = 4\ кГ,\ \ p_4 = 8\ кГ,\ \ p_5 = 16\ кГ.$$

Сума їх ваги $1+2+4+8+16=31>30\ кГ$. Крім того, кожне число Q, яке не перевищує 31, можна подати у вигляді

$$Q = b_4 2^4 + b_3 2^3 + b_2 2^2 + b_1 2 + b_0,$$

де кожен з коефіцієнтів b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 буде, як нам і потрібно, або нулем, або одиницею.

Нехай, наприклад, треба зважити вантаж в 22 $кГ$. Запишемо число 22 за двійковою системою:

$$22 = 10110_2.$$

Отже, треба взяти гирі $p_2 = 2\ кГ$, $p_3 = 4\ кГ$ і $p_5 = 16\ кГ$.

Тепер дещо видозмінимо задачу: нехай треба вибрати 4 гирі, з допомогою яких можна було б зважити будь-який вантаж до 40 $кГ$, при умові, що гирі можна класти і на ліву, і на праву шальку терезів.

Неважко переконатися, що для розв'язання цієї задачі треба скористатися трійковою системою числення, тобто вибрати такі 4 гирі:

$$p_1 = 1\ кГ,\ \ p_2 = 3\ кГ,\ \ p_3 = 9\ кГ,\ \ p_4 = 27\ кГ.$$

Нехай, наприклад, треба зважити вантаж в 19 $кГ$. Число 19 подамо у вигляді:

$$19 = 3 \cdot 6 + 1 = 3 \cdot (3 \cdot 2) + 1 = 2 \cdot 9 + 1 = 0 \cdot 27 + 2 \cdot 9 + 0 \cdot 3 + 1 = 201_3.$$

Тепер вантаж в 19 $кГ$ кладемо на праву шальку терезів. На ліву кладемо вантаж в 1 $кГ$. Далі треба було б покласти туди ще 2 гирі по 9 $кГ$, але в нас є тільки одна така гиря.

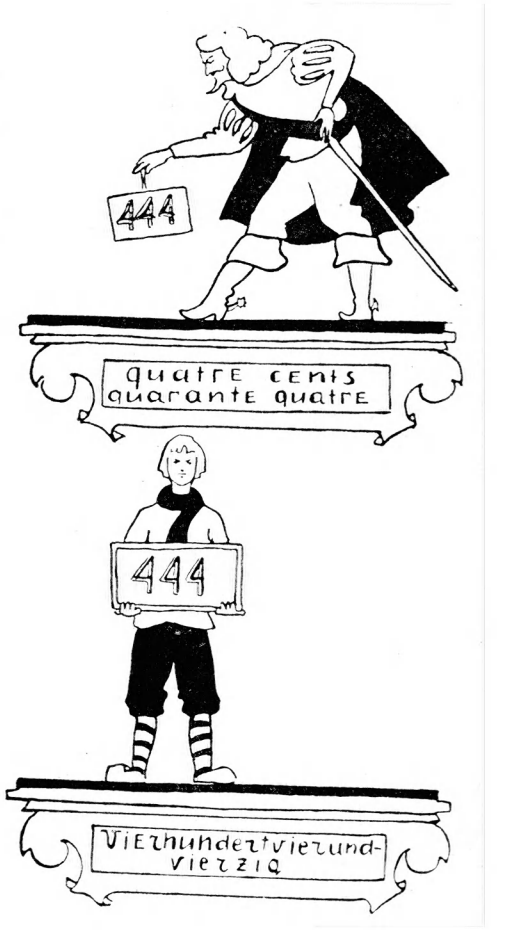
Але $18 = 2 \cdot 9$ можна подати ще й інакше:

$$18 = 2 \cdot 9 = (3 - 1) \cdot 9 = 27 - 9,$$

тобто на ліву шальку терезів треба покласти ще гирю в 27 $кГ$, на праву — в 9 $кГ$.

Так само будемо робити в інших випадках. Якщо $Q \leqslant 40\ кГ$, то його можна завжди подати у вигляді:

$$Q = b_3 3^3 + b_2 3^2 + b_1 3 + b_0,$$



І росіянин, і француз, і німець одне й те саме число назвуть по-різному (на своїй мові), а запишуть його однаково.

де кожен з коефіцієнтів b_0, b_1, b_2, b_3 може дорівнювати 0, 1 або 2. Якщо він дорівнює нулеві, то відповідну гирю залишаємо в стороні; якщо — одиниці, то кладемо її на ліву шальку терезів; якщо — двом, то робимо так, як ми це щойно робили, тобто кладемо гирю на праву шальку терезів, а наступну за величиною гирю — на ліву.

Слід пам'ятати, що, хоч у різних системах числення числа записуються по-різному, основні властивості їх від цього не міняються: так, число 20 ділитиметься на 2, у якій би системі ми його не записали, а 27 не буде ділитися на 2, але буде ділитися на 3. Числа 3, 5 і 7 залишаться простими в будь-яких системах числення. Проте ознаки подільності, які встановлюють, виходячи із запису числа в певній системі числення, змінюватимуться разом з основою системи. Так, число ділиться на 5, якщо його запис за десятковою позиційною системою закінчується на нуль або п'ятірку. Але число не завжди ділиться на 5, якщо на нуль закінчується його запис у трійковій системі, наприклад, числа 10_3 (тобто 3), 100_3 (тобто 9), 1000_3 (тобто 27) не діляться на 5, а число 120_3 (тобто 15) ділитиметься на 5.

НАША УСНА ЛІЧБА

Тепер перед нами, природно, постає запитання: чому ми все-таки користуємося десятковою системою, а не системою з іншою основою? І ще: чи завжди люди записували числа, користуючись позиційним принципом?

На ці запитання ми і постараємося тепер відповісти.

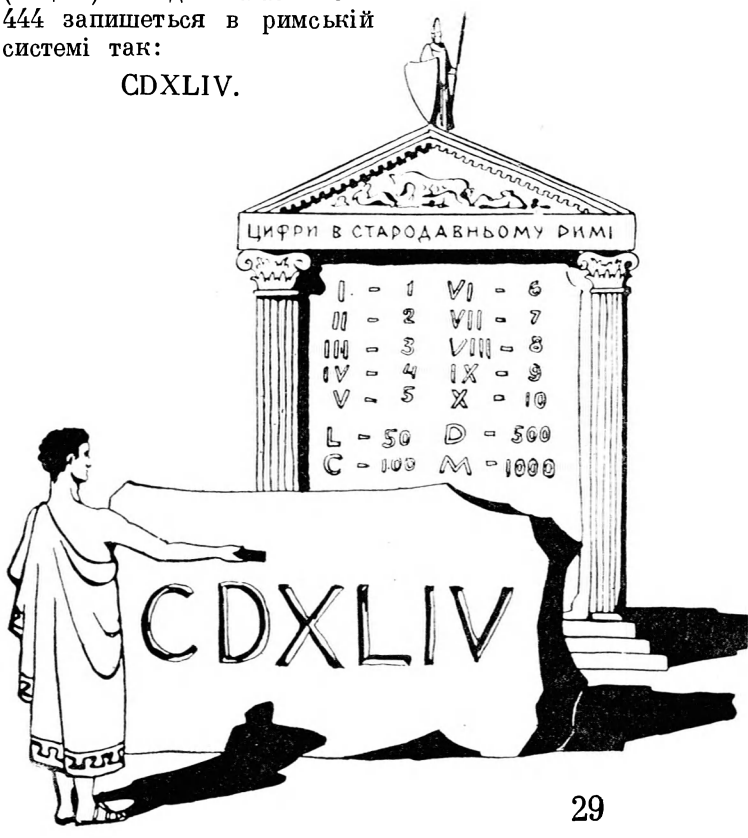
Щоб краще зрозуміти, як люди лічили за старих часів, звернемося спочатку до нашої мови, до нашої усної лічби. Насамперед зауважимо, що наша усна лічба дуже відрізняється від письмової.

Як ми називаємо число 444? Ми говоримо: «Чотириста сорок чотири», тобто вимовляємо три різних слова. У той же час це число ми записуємо трьома однаковими знаками. Якщо те саме число треба буде записати німцеві або французові, то вони напишуть такі ж три знаки, а вимовить кожен з них різні слова, один — по-німецькому, другий — по-французькому.

Отже, наша письмова нумерація має міжнародний характер, тоді як назви числівників і способи їх утворення у різних народів різні. Але справа не тільки в цьому. Давайте розглянемо докладніше, як ми називаємо числа. Для нуля і перших дев'яти чисел ми вживаємо спеціальні назви: «нуль», «один», «два»,.., «дев'ять»; для наступного числа у нас є нове слово — «десять»; ми не кажемо «один, нуль», хоч і записуємо це число з допомогою одиниці та нуля: 10.

Всі числа від 11 до 99, як правило, складаються з назв перших чисел: «одинадцять» (тобто один-на-десять), «тридцять один» (тобто тридесять-один) і т. д. Для 100 ми вживаємо нове слово — «сто». Всі числа від 101 до 999 знову складені, а для 1000 знову вводиться слово «тисяча». Далі теж йдуть нові слова: «мільйон», «більйон», «трильйон» і т. д. Як бачимо, в міру зростання самих чисел зростає і кількість назв для них. З цього виходить, що спосіб найменування чисел не є позиційним. Наша усна лічба зберегла сліди якихось більш старих нумерацій, однією з яких ми і зараз користуємося при запису чисел за римською системою. Тут є спеціальні знаки для одиниці (I), п'яти (V), десяти (X), п'ятдесяти (L), ста (C), п'ятисот (D) і тисячі (M). Решта чисел записується за допомогою цих символів із застосуванням додавання і віднімання: III, наприклад, є запис числа три (I + I + I), IV — числа чотири (V — I), VI — числа шість (V + I) і т. д. Наше число 444 запишеться в римській системі так:

CDXLIV.



Ця форма запису менш зручна, ніж та, якою ми тепер користуємося. Тут чотири одиниці записуються одними символами (IV), чотири десятки — другими (XL), чотири сотні — третіми (CD). Запис чисел виходить набагато довший. Але не тільки в цьому справа: з числами, записаними в римській нумерації, дуже важко виконувати арифметичні дії. Спробуйте, наприклад, перемножити 444 і 36, якщо обидва числа позначені римськими цифрами, і ви відразу ж переконаєтеся в трудності задачі. Самі римляни користувалися для виконання арифметичних операцій спеціальною лічильною дошкою — абаком.

У римській системі є і ще один істотний недолік: вона не дає способу для запису яких завгодно великих чисел. Наприклад, щоб написати за цією системою 1 000 000, треба або 1000 раз повторити знак M, або ввести новий символ. Таким чином, для запису чисел в міру їх зростання треба буде вводити все нові і нові знаки. І це тому, що римська нумерація не є позиційною. Знак V, наприклад, означає в ній тільки п'ять одиниць і не може позначати п'яти десятків або п'яти сотень. Римська нумерація не є і строго десятковою. В ній збереглися сліди іншої основи — п'яти. Справді, тут є спеціальні знаки для п'яти, п'ятдесяти і п'ятисот.

У нашій усній лічбі є деякі риси, що нагадують цю систему. Так, ми теж вдаємося до операції додавання, утворюючи числівники від 11 до 19: «одинадцять» (один-на-десять) і т.д. Але, починаючи з 20, ми користуємося для утворення числівників ще й множенням, чого немає в римській системі: «двадцять» означає два-десять, тобто два × десять, «тридцять» — три × десять.

У нашій мові збереглися також сліди нумерації з основою 40, якою користувалися наші предки. Справді, для цього числа вживається нова, нескладена назва — «сорок»; нам відомі такі вирази: «сорок сороків церков», «сорок сороків чорних соболів». Про те, що число 40 колись відігравало особливу роль при лічбі, свідчать і деякі зв'язані з ним повір'я. Так, сорок перший ведмідь вважався згубним для мисливця. Аналогічно до цього дуже поширений у європейських народів забобон, ніби число 13 є нещасливим. Це зв'язано з тим, що колись була поширена дванадцяткова система числення.

У французькій мові збереглися сліди нумерації з основою 20; число 80 читається: quatre-vingts — «чотири-двадцять»; число 90: quatre-vingts-dix — «чотири-двадцять-десять»; число 120 — «шість-двадцять»; у старофранцузькій мові й інші назви чисел складалися аналогічно. Сліди двадцяткової системи збереглися також в англійській і голландській мовах, сліди п'ятіркової — у скандінавських мовах.

Отже, усна мова показує, що наші предки користувалися непозиційною нумерацією, причому як основи, крім десяти, були й інші числа.

Які ж джерела дають змогу відповісти на запитання: як люди лічили за старих часів?

По-перше, на земній кулі збереглися народи, які ще недавно стояли в багатьох відношеннях на такому ж низькому рівні розвитку, як і наші далекі предки. Багато мадрівників і дослідників описали чимало способів лічби, які застосовувалися у таких народів. Це — одне джерело, з яким ми ознайомимося.

Другим джерелом є письмові документи стародавніх народів: єгиптян, вавілонян, стародавніх греків, індійців племені майя та ін. Нарешті, російські рукописи XI—XII століть допоможуть нам дізнатися, як лічили раніше в Росії. Отже, почнемо по порядку.

ЛІЧБА У ПЕРВІСНИХ НАРОДІВ

Ще недавно існували племена, в мові яких були назви тільки двох чисел: «один» і «два».

Але це не значить, звичайно, що представники племені не могли полічити більшу кількість предметів.

У жителів островів, розташованих в Торресовій протоці, єдиними числівниками були «урапун» (один) і «окоза» (два). Остров'яни лічили так: «окоза-урапун» (три), «окоза-окоза» (чотири), «окоза-окоза-урапун» (п'ять) і «окоза-окоза-окоза» (шість). Про числа, починаючи з 7, тубільці говорили «багато». Таким чином, люди тут освоїли тільки скінченне число цілих чисел. До речі, багато російських прислів'їв говорить про те, що саме так справа стояла і у наших предків. Ми говоримо: «У семи няньок дитина без ока», «Сім бід — один одвіт», «Семеро одного не ждуть», «Сім раз одміряй, один раз відріж». Тут, очевидно, число «сім» вживається як «багато»: у великого числа няньок дитина без ока, багато бід — один одвіт і т. д.

Але повернемося до нашої розповіді.

Дуже рано в людей з'явилася потреба говорити один одному про те, що ось таке-то число предметів треба доставити через стільки-то днів або що кожне плем'я повинно виставити таке-то число воїнів. І навіть ті народи, в яких було тільки два числівники, вміли в якійсь-то мірі «полічити» досить велику кількість предметів. Ось як, за оповіданням видатного російського мандрівника М. М. Міклухо-Маклая, робили тубільці Нової Гвінеї: «Улюблений спосіб лічби полягає в тому, що папуас загинає один за одним пальці руки, при цьому видає певний звук, наприклад «бе-бе-бе»... Долічивши до п'яти, він говорить «ібон-бе» (рука). Потім він загинає пальці другої руки, знову повторює «бе-бе»... поки не доходить до «ібон-алі» (дві руки). Потім він іде далі, промовляючи «бе-бе», поки не доходить до «самба-бе» і «самба-алі» (одна нога, дві ноги). Якщо треба лічити далі, папуас користується пальцями рук і ніг когось іншого».

Отже, предметам при лічбі звичайно ставили у відповідність пальці рук і ніг. При переговорах тубільцеві досить було сказати, наприклад, що він дійшов у своїй лічбі до третього пальця правої ноги. Тоді, щоб відлічити потрібну кількість предметів, лічбу починали спочатку, від першого пальця правої руки. При цьому, відлічуючи кожен палець, одночасно лічили і предмети. Остров'яни Торресової протоки для такого перелічування вживали не тільки пальці, а й інші частини тіла (зап'ястя, лікоть, плече), але завжди в певному порядку. Так вони могли перелічувати до 33 предметів.

Суть цього способу полягає в тому, що рівночисельність деяких сукупностей предметів встановлювалась за допомогою зіставлення їх з частинами тіла, а іноді і просто паличками. Звичайно, найзручнішим «інструментом» лічби є пальці, внаслідок чого предмети при лічбі найчастіше групували по п'ять, по десять і по двадцять. Цим і пояснюється те, що основою більшості систем числення, які склалися, є 10 (за числом пальців на обох руках), а іноді 5 або 20.

З часом господарство племен ставало дедалі складнішим і більшим. Частіше доводилося лічити чимраз більшу кількість різних предметів, і просте встановлення рівночисельності за допомогою лічби на пальцях перестало задовольняти людей.

Люди поступово звикали при лічбі розміщувати предмети стійкими групами по два, по десять або дванадцять. З'явилися спеціальні

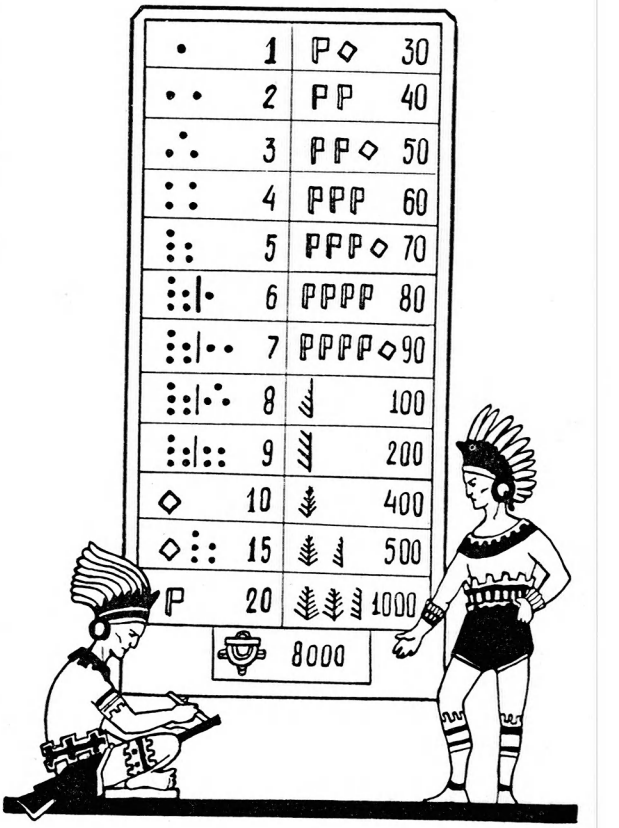
М. М. Міклухо-Маклай серед папуасів.

слова для позначення таких стійких сукупностей предметів. Так, у тубільців Флоріди слово «на-куа» позначало 10 яєць, «на-банара» — 10 кошиків. Але слово «на», яке, здавалося б, відповідає числу 10, окремо не вживалося. Те саме можна було спостерігати на островах Фіджі і Соломонових, де були спеціальні назви для 100 човників, 100 кокосових горіхів, 1000 кокосових горіхів і в той же час абстрактних чисел не було. Числа були, по суті, іменовані; це ще «числа-сукупності» конкретних предметів.

Але з часом такими стійкими «числами-сукупностями» почали позначати не тільки дані предмети, а й інші, подібні до них. Наприклад, «числа-сукупності», які позначають певну кількість горіхів, могли згодом вживатися для лічби круглих предметів. Це привело до того, що у багатьох мовах первісних народів утворилось кілька рядів числівників: одні з них вживалися тільки для лічби людей, другі — для підрахунку круглих предметів, треті — довгастих і т. д. Так, наприклад, у чишмієнів (Британська Колумбія) було сім видів числівників, кожен з яких застосовувався для лічби предметів певного виду.

Однак у більшості народів числа, якими лічили «гроші», поступово витіснили всі інші. Мабуть, це сталося тоді, коли грішми в основному була худоба: доводилося підраховувати стада, обмінювати на них інші предмети. Природно, що числа, які використовувалися для підрахунку худоби, набули найбільшого поширення: їх усі добре знали. Вони-то і стали тими універсальними числами, які дозволили лічити будь-які предмети.

Однак так утворилися тільки ті числа, яким відповідали «числа-сукупності»: якщо лічба провадилася десятками, то з'явилися назви для десяти, десяти десятків (тобто ста), десяти сотень (тобто тисячі). Крім того, індивідуальних назв дістали, як правило, всі числа, менші від десяти. Щодо чисел 11, 12, ..., 19, 21 і т. д., то їх від самого початку складали з основних за допомогою тих операцій, які спочатку фактично виконувалися над перелічуваними предметами. Так, у мові кламатів (Північна Америка), а також племен Британської Колумбії для позначення таких складених чисел вживалися спеціальні дієслова. Наприклад, індієць говорив: «На два рази по десять плодів я кладу зверху шість», і це означало «26 плодів». Така фраза повністю відповідає фактичному перелічуванню: індійці розміщували 10 предметів у ряд, з одинадцятого починався новий ряд



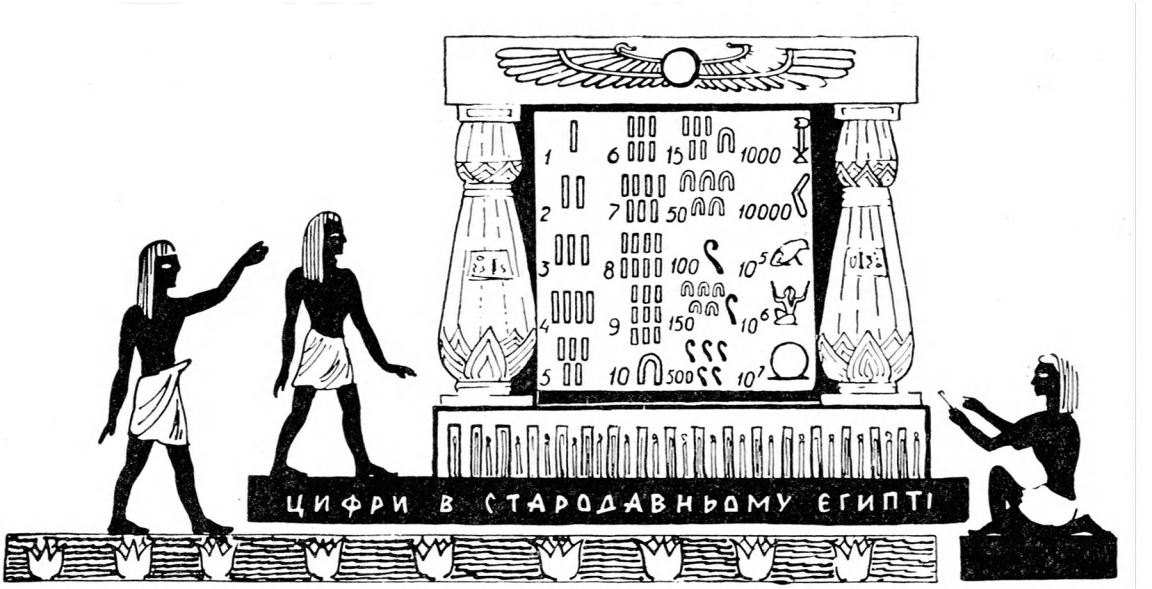
Так позначали числа індійці племені ацтеків (Мексіка) в XI—XVI століттях.

і т. д. А поступово ці рухові операції перейшли в арифметичні.

Доброю ілюстрацією до такого способу лічби є позначення чисел, прийняті в XI—XVI століттях індійцями племені ацтеків (Мексіка): одиницю вони позначали крапкою, двійку — двома крапками (див. рисунок) і т. д. до п'яти.

До запису числа 6 входила вертикальна риса, яка відділяла п'ять перших крапок від шостої. Ясно, що тут лічба провадилася групами по п'ять предметів. Риса відділяла одну таку групу від іншої, причому сама риса ніякого числа не позначала.

Основною операцією для утворення складених чисел було додавання, але поряд з цим застосовувалося і віднімання, а іноді навіть множення. Наприклад, в російській мові, як ми вже говорили, для утворення числівників вживаються і додавання, і множення (двадцять сім: два × десять + сім). В угрофінських мовах застосовується і віднімання: чис-



ло 8 там вимовляється як «два-десять» (тобто десять без двох), 80 — як «два-сто», 800 — «два-десять-сто» («десять-сто», тобто тисяча, — принцип множення!). Так відбувалося освоєння натурального ряду чисел. Поглянемо тепер, якими були перші записи чисел і як люди оперували числами.

ПЕРШІ НУМЕРАЦІЇ

Одна з стародавніх нумерацій — єгипетська. До нас дійшли написи, що збереглися всередині пірамід, на плитах і обелісках. Вони складаються з картинок-ієрогліфів, які зображають птахів, звірів, людей, частини людського тіла (очі, ноги) та різні неживі предмети. Такий спосіб письма взагалі характерний для ранніх ступенів культури. Подібні письмена були у жителів Центральної Америки — індійців племені майя, в Перу, в Стародавньому Китаї. Розшифровувати їх надзвичайно важко, бо часто невідомі ні мова стародавніх народів, ні значення окремих ієрогліфів. Здавалося б, це завдання нерозв'язне. І все-таки багато написів уже прочитано! Спочатку були розгадані письмена стародавніх єгиптян, потім — вавілонський клинопис. У 30-х роках нашого століття чеський учений Грозний прочитав хеттські написи, які довго не піддавалися розшифруванню. І, нарешті, зовсім недавно радянський учений Кнорозов знайшов ключ до розгадки письмен індійців племені майя і до написів з острова Пасхи.

Збереглися два математичних папіруси, які дають змогу судити про те, як лічили стародавні єгиптяни. Один з них зберігається в Британському музеї, а другий — в Музеї образотворчого мистецтва в Москві.

Для запису чисел стародавні єгиптяни вживали такі ієрогліфи, що позначають (послідовно): одиницю, десять, сто, тисячу, десять тисяч, сто тисяч (жаба), мільйон (людина з піднятими руками), десять мільйонів.

Вважають, що ієрогліф для сотні зображає вимірювальну вірьовку, для тисячі — квітку лотоса, для десяти тисяч — піднятий вгору палець, а для десяти мільйонів — весь Всесвіт. Усі інші числа складалися з основних з допомогою тільки однієї операції — додавання. При цьому запис виконувався не зліва на-

Так написали б 444 стародавні єгиптяни.

право, як у нас, а справа наліво. Число 15, наприклад, записувалося так:

А число 444 писали так:

Ми бачимо, що староєгипетська нумерація подібна до римської, тільки при запису чисел не вживається віднімання.

Знайомлячись з римською нумерацією, ми переконалися, до чого незручно множити числа, записані в непозиційній системі. Як же лічили стародавні єгиптяни? Виявляється, множення і ділення вони виконували послідовним подвоєнням чисел. Нехай, наприклад, треба помножити 19 на 37. Єгиптяни послідовно подвоювали число 37, причому в правому стовпчику записували результати подвоєння, а в лівому — відповідні степені двійки:

1	37
2	74
4	148
8	296
16	592

Подвоювання продовжували доти, поки не виходило, що з чисел лівого стовпчика можна скласти множника (в нашому прикладі 19 = = 1 + 2 + 16). Єгиптяни відмічали відповідні рядки вертикальними рисочками і додавали ті числа, які стояли в цих же рядках справа. В даному разі треба додати 37 + 74 + + 592 = 703. Так діставали добуток.

Якщо число 703 треба було поділити на 19, то єгиптяни починали послідовно подвоювати дільник і продовжували це доти, поки числа правого стовпчика залишалися меншими від 703. Потім з чисел правого стовпчика вони намагалися скласти ділене, і тоді сума відповідних чисел в лівому стовпчику давала дільник:

1	19
2	38
4	76
8	152
16	304
32	608

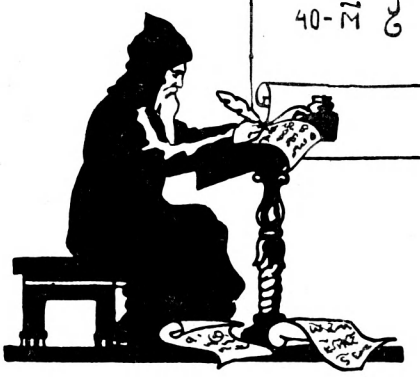
В даному разі 703 = 608 + 76 + 19, тобто частка буде 1 + 4 + 32 = 37. Коли б ділене не ділилося без остачі на дільника, то його не вдалося б скласти з чисел правого стовпчика. Ми дістали б і частку, і остачу.

Єгипетський спосіб множення не важкий, але він потребує дуже великої кількості операцій, навіть при множенні двоцифрових чисел. Коли б довелося перемножувати таким же способом дуже великі числа, ми не могли б обійтися без допомоги машини. Зауважимо також, що для множення і ділення єгиптяни користувалися фактично поданням числа за двійковою системою.

АЛФАВІТНІ НУМЕРАЦІЇ. ПСАМІТ

Ми бачили, що непозиційні нумерації малозручні: запис чисел в них дуже довгий, арифметичні операції виконувати важко. В міру розвитку торгівлі і ремесел ці незручності ставали чимраз відчутнішими, і ось у Малій Азії, де були старогрецькі колонії, які вели жваву торгівлю, в середині V ст. до н. е. з'явилася система числення нового типу, так звана алфавітна нумерація. Її звичайно називають іонійською. У цій системі числа позначалися за допомогою букв алфавіту, над якими ставили рисочки: перші дев'ять букв позначали числа від 1 до 9, наступні дев'ять — числа 10, 20, 30 до 90 і наступні дев'ять — числа 100, 200 до 900. Таким чином можна було позначати будь-яке число до 999.

Для позначення чисел 1000, 2000, ..., 9000 греки вживали ті самі букви, що й для чисел 1, 2, ..., 9, але тільки при їх запису ставили косу рисочку зліва внизу. Як це робилося, видно з пропонованого рисунка. Далі, для числа 10 000 застосовувався знак $\overset{\alpha}{\text{М}}$ — це число називалося міріадою, дві міріади, тобто 20 000, позначалися так: $\overset{\beta}{\text{М}}$. Цим способом можна було позначити всі числа до міріади міріад, тобто до 10^8. Вищі десяткові розряди вже не могли бути записані в іонійській нумерації і не мали назви в старогрецькій мові.



Так записувалися числа в старослов'янській нумерації.

Великий математик, механік і інженер далекої давнини Архімед (III ст. до н. е.) присвятив цілий твір тому, щоб дати загальний прийом найменування яких завгодно великих чисел. Здавна у греків, як, зрештою, і в інших народів, наочним образом для уявлення про дуже велику і навіть незліченну кількість було число піщинок.

У народних казках, наприклад, зустрічається «нерозв'язна» задача: полічити зорі на небі, краплі в морі або піщинки на землі. Архімед показав, що такі задачі можна розв'язати. Свій твір він так і назвав «Обчислення піску» («Псаміт»). В ньому він побудував систему лічби, в якій були числа, що не тільки перевищували кількість піщинок в його рідній Сіцілії, а й такі, які більші від числа піщинок у Всесвіті, якщо навіть вважати, що Всесвіт геть увесь заповнений піском. Але що ж розуміли греки часів Архімеда під усім Всесвітом? У своєму творі Архімед, йдучи за грецьким астрономом Арістахом Самоським, вважав, що в центрі Всесвіту знаходиться Сонце, а Земля та інші планети обертаються навколо нього. Всесвіт має форму сфери, на поверхні якої розташовані нерухомі зорі. Це була перша геліоцентрична система світу.

Для підрахунку кількості піщинок Архімед повинен був хоч би приблизно визначити розміри діаметрів Всесвіту і піщинки, а потім знайти відношення їх об'ємів. Архімед зробив це, спираючись на дані астрономії свого часу і на власні дослідження в цій галузі. Число піщинок, яке він повинен був при цьому дістати, в нашій нумерації записується так: 10^{63}. Це дуже велике число, і до Архімеда не було засобів ні для запису, ні для найменування чисел такого порядку.

Щоб розв'язати поставлену задачу, Архімед робить так: всі числа, менші від міріади міріад, тобто всі числа від 1 до $10^8 - 1$, він об'єднує в першу октаду (тобто восьмерицю) і називає їх «першими числами». Число 10^8 є одиницею другої октади, до якої входять усі числа від 10^8 до $10^{2 \cdot 8} - 1$. Це — «другі числа». Аналогічно до цього число $10^{2 \cdot 8}$ є одиницею третьої октади, а числа від $10^{2 \cdot 8}$ до $10^{3 \cdot 8} - 1$ є «третіми числами». Продовжуючи цю побудову, можна дійти до міріадо-міріадної октади, яка містить числа від $10^{(10^8-1) \cdot 8}$ до $10^{8 \cdot 10^8} - 1$. Усі ці октади Архімед об'єднує в перший період. Число $10^{8 \cdot 10^8}$ є одиницею першої октади другого періоду і т. д. Цим способом можна дійти до останнього числа останньої октади міріадо-міріадного періоду. Тут Архімед спиняється, але ясно, що з допомогою його способу можна йти і далі, об'єднавши всі періоди в який-небудь новий розряд.

Але і тих чисел, які побудував Архімед, цілком досить для підрахунку числа піщинок у Всесвіті. Потрібне число міститься вже у вось-

мій октаді першого періоду. Архімед продовжив свою побудову далі для того, щоб роз'яснити метод найменування яких завгодно великих чисел.

Спосіб Архімеда близький до позиційного, але потрібно було ще майже тисячу років, перш ніж людству вдалося створити десяткову позиційну систему числення.

Алфавітні системи були, крім іонійців, у стародавніх євреїв, фінікійців, вірменів, грузинів та інших народів. Алфавітна нумерація була прийнята і в Древній Русі. Над буквами, що позначали числа, ставили спеціальний знак — титло. Це робилося для того, щоб відрізняти їх від звичайних слів.

Чи зручні алфавітні системи?

Запишемо в слов'янській нумерації число 444:

Ми бачимо, що запис вийшов не довший від нашого. Це пояснюється тим, що в алфавітних нумераціях було 27 цифр, тоді як в єгипетській, наприклад, для позначення всіх чисел до 1000 було лише три цифри.

Але алфавітні нумерації мали і великий недолік: з їх допомогою не можна позначати які завгодно великі числа. Вони були дуже зручні тільки для запису чисел до 1000.

Правда, слов'яни, як і греки, вміли записувати і більші числа, але для цього до алфавітної системи вони додавали нові позначення. Числа 1000, 2000 і т. д. вони записували тими ж буквами, що й 1, 2 і т. д., тільки зліва внизу ставили спеціальний знак, наприклад, 1000 позначали .

Аналогічно 2 = 2000 =

3 = 3000 =

9 = 9000 =

Число 10 000 знову позначали тією ж буквою, що й 1, тільки без титла, але його вже обводили кружечком: 10 000 = . Називалося це число «тьмою». Звідси, між іншим, походить вираз «тьма народу».

Отже, для позначення тем перші 9 цифр обводили кружечками:

20 000 = , 30 000 = , 40 000 = ,

50 000 = , ... , 90 000 = .

10 тем, або 100 000, було одиницею вищого розряду. Її називали л е г і о н. Для позначення легіонів навколо перших 9 цифр ставили кружечок з крапок:

100 000 = , 200 000 = , 900 000 = . 10 легіонів становили нову одиницю, яка називалася л е о д р. Для позначення леодрів відповідні числа брали в кружечок з рисочок:

1 000 000 = , 2 000 000 = і т. д.

Ці позначення можна розглядати як зачатки позиційної системи, бо в ній для позначення одиниць різних розрядів застосовувалися одні й ті ж символи, до яких додавали знаки для визначення розряду. Таку систему називали «малим числом». В ній позначення не йшли далі мільйонів.

Але поряд з цим було і «велике» число, в якому словом т ь м а позначали вже 1 000 000. Тьма тем (тобто 10^{12}) називалась л е г і о н о м, легіон легіонів (тобто 10^{24}) — л е о д р о м, леодр леодрів (тобто 10^{48}) — в о р о н о м, і, нарешті, число 10^{49} називалося к о л о д о ю. В рукопису XVII ст. говориться: «И более сего несть человеческому уму разумевати», тобто для більших чисел вже немає назв. Для позначення воронів букви ставили в кружечок з хрестиків: , а колоду позначали так: .

Алфавітні нумерації, як ми говорили, були мало придатні для оперування з великими числами, що зустрічалися вже в далекій давнині (наприклад, при астрономічних розрахунках). У ході розвитку людського суспільства ці системи уступили місце позиційним. Але залишки алфавітних нумерацій збереглися в нашому вжитку і по цей день. Так, ми часто нумеруємо пункти з допомогою букв алфавіту. Правда, букви тут позначають тільки послідовний порядок, а не кількість. Ніяких арифметичних операцій з такими буквами ми вже не виконуємо.

ПОЗИЦІЙНІ СИСТЕМИ

Першою відомою нам позиційною системою числення була шістдесятирична система вавілонян, яка виникла приблизно за 2500—2000

років до н. е. Основою її було число 60. Отже, в ній повинно було бути 60 цифр. А таблиця множення мала складатися з

$$\frac{60 \cdot 60}{2} = 1800 \text{ рядків.}$$

Як же вавілоняни записували свої цифри і як вони запам'ятовували таку величезну таблицю множення?

Вавілоняни робили так: вони записували всі числа від 1 до 59 за десятковою системою, застосовуючи принцип додавання. При цьому вони користувалися завжди двома знаками: прямим клином 𒁹 для позначення 1 і лежачим клином 𒌋 — для 10. Число 32, наприклад, писали так: 𒌋𒌋𒌋𒁹𒁹.

Ці знаки і були цифрами в їх системі. Число 60 знову позначалося тим же знаком, що й 1, тобто 𒁹. Так само позначалися 3600, 60^3 і всі інші степені 60. Наприклад, число 92 записували так: 𒁹𒌋𒌋𒌋𒁹𒁹.

Таким чином, «цифри», тобто всі числа від 1 до 59, вавілоняни записували за десятковою непозиційною системою, а число в цілому — за позиційною системою з основою 60. Тому-то ми і називаємо їх систему шістдесятиричною (а не шістдесятковою, як треба було називати, коли б ми враховували тільки одну основу 60).

Але нумерація вавілонян мала і ще одну важливу особливість: у ній не було знака для нуля. І коли був зображений прямий клин 𒁹, то без додаткових пояснень не можна було визначити, яке число записано: 1, 60, 3600 або який-небудь інший степінь 60. Запис числа 92, наведений вище, міг позначати не тільки $92 = 60 + 32$, але і $3600 + 32 = 3632$. Він міг також позначати

$$1\frac{32}{60} \quad \text{або} \quad 1\frac{32}{3600} \text{ і т. д.}$$

Таким чином, запис у вавілонській нумерації не має абсолютного характеру — для визначення абсолютного значення числа потрібні були ще додаткові відомості. Згодом вавілоняни запровадили спеціальний символ для позначення пропущеного шістдесяткового розряду. Наприклад, число 3632 треба було б записати так:

𒁹𒁹𒌋𒌋𒌋𒁹𒁹.

Але в кінці числа цей символ ніколи не ставили.

Таблицю множення вавілоняни ніколи не запам'ятовували — це було майже неможливо. Вони користувалися при своїх обчисленнях готовими таблицями множення, так само як ми тепер користуємося, наприклад, таблицями логарифмів. При розкопках було знайдено дуже багато таких таблиць.

Шістдесятирична система вавілонян відіграла велику роль в розвитку математики і астрономії. Сліди її збереглися до наших днів. Так, ми досі ділимо годину на 60 хвилин, а хвилину — на 60 секунд. Так само за прикладом вавілонян коло ми ділимо на 360 частин (градусів).

Клинописний запис чисел стародавніх вавілонян.

На початку нашої ери індійці племені майя, які жили на півострові Юкатан в Центральній Америці, користувалися іншою позиційною системою — з основою 20. Свої цифри індійці майя, як і вавілоняни, записували, користуючись принципом додавання. Одиницю вони позначали крапкою, а п'ять — горизонтальною рисою (див. рисунок на стор. 38), але в цій системі вже був знак для нуля. Він нагадував за своєю формою напівзаплющене око. І, наприклад, число 20 індійці майя записували за допомогою знака для оди-

ниці і внизу знака для нуля (числа писали не в рядок, а стовпчиками).

Десяткова позиційна система вперше склалася в Індії не пізніше VIII ст. н. е. Тут же вперше був введений нуль.

Отже, позиційні системи числення виникли незалежно одна від одної в Стародавньому Дворіччі, у племені майя і, нарешті, в Індії. Все це говорить про те, що виникнення позиційного принципу не було випадковістю. Які ж були передумови для його створення? Що привело людей до цього визначного відкриття?

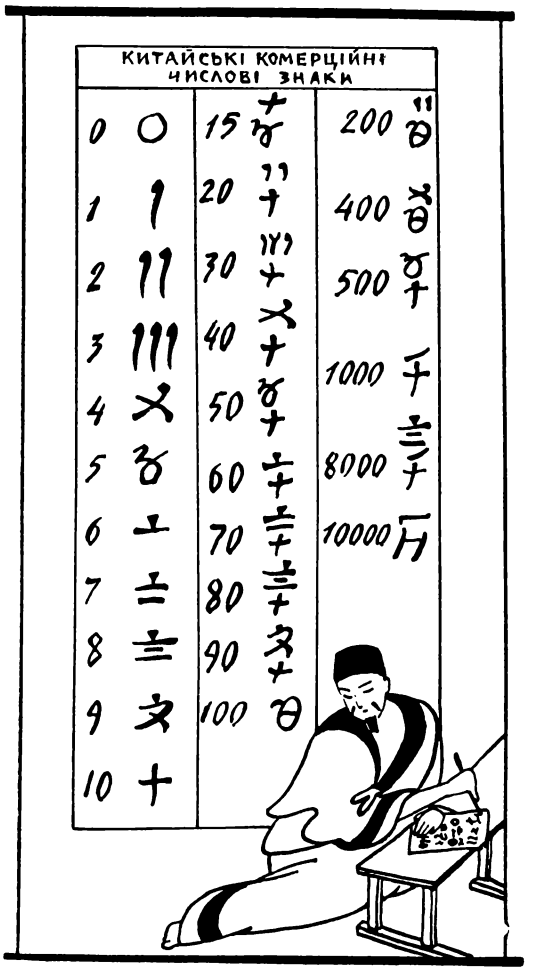
Щоб відповісти на ці запитання, ми знову звернемося до історії. В Стародавньому Китаї, Індії та в деяких інших країнах існували системи запису, побудовані на мультиплікативному принципі. Нехай, наприклад, десятки позначаються символом Х, а сотні — С. Тоді запис числа 323 схематично матиме такий вигляд:

3С2Х3.

У таких системах для запису однакового числа одиниць, десятків, сотень або тисяч застосовуються ті самі символи, але після кожного символу пишеться назва відповідного розряду. На аналогічному принципі грунтується наша рахівниця: одна і та ж кількість кісточок позначає число десятків, сотень, тисяч і т. д., залежно від того, в якому ряду містяться ці кісточки.

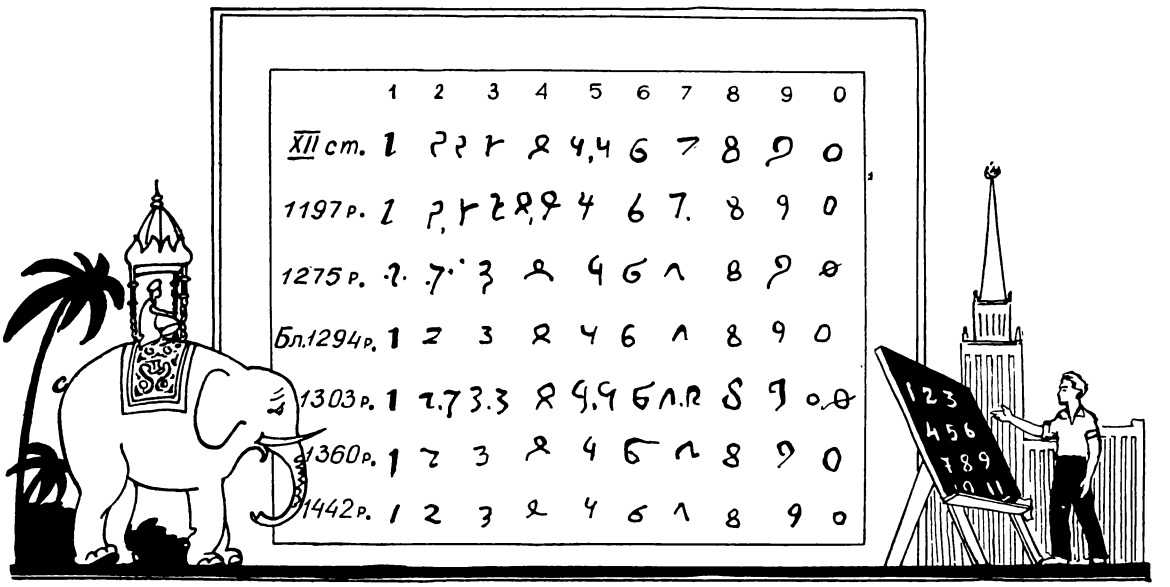
Але саме такий спосіб лічби застосовувався при лічбі «числами-сукупностями». Так, йоруби[1], лічачи раковини-каурі (що відігравали у них роль грошей), розкладали їх у купки по 20 раковин у кожній, потім 20 таких купок вони об'єднували в одну велику купу і т. д. При такому способі лічби підкреслюється та обставина, що з купами можна оперувати так само, як і з окремими раковинами. М. М. Міклухо-Маклай розповідав про спосіб лічби у папуасів, який вже дуже наближається до побудови чисел за принципом множення. Щоб підрахувати число днів до повернення корвета «Витязь», папуаси робили так:

«...перший, розкладаючи клаптики паперу на коліні, при кожному обрізку повторював «каре-каре» (один), другий повторював слово «каре» і загинав при цьому палець спочатку на одній, потім на другій руці. Налічивши до десяти і зігнувши пальці обох рук, він опустив обидва кулаки на коліна, повторивши «дві



Цифри індійців племені майя.

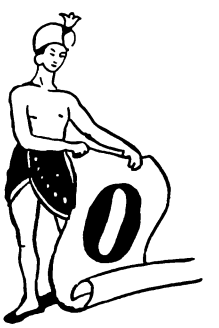
[1] Одне з африканських племен.



Поступово видозмінюючись, цифри «губар» (перший рядок) набули форми, близької до сучасної.

руки», причому третій папуас загнув один палець руки. З другим десятком було зроблено те саме, причому третій папуас загнув другий палець; те саме було зроблено для третього десятка».

Розповідають, що так само підраховували стада в Південній Африці: один з негрів рахував кожну голову, другий — число десятків, полічених першим, а третій — число десятків, полічених другим, тобто число сотень. Коли б ми тепер позначили палець першого через 1, палець другого за допомогою X і палець третього — С, то результат за мультиплікативною системою записали б, наприклад, так: ЗС5Х3. У Китаї та Індії з найдавніших часів існував саме такий спосіб запису чисел. Крім того, індійці здавна виявляли глибокий інтерес до великих чисел і способів їх запису. В одній з індійських книг — «Лалітавістара» — говориться про змагання між женихами прекрасної Гопи. Предметом змагання були письменність, арифметика, боротьба і майстерність стріляння з лука. Майже половина книги присвячена опису змагань з арифметики. Переможець Гаутама придумав шкалу чисел, що йшли в геометричній прогресії із знаменником 100, останнім членом якої було $10^{7+9\cdot46}$.



Дальшим ступенем до позиційного принципу було опускання назв розрядів при письмі (подібно до того, як ми говоримо «три двадцять», а не «три карбованці двадцять копійок»). Але при запису великих чисел за системою з основою 10 дуже часто був потрібний символ для позначення нуля. Введення такого символу увінчало створення сучасної нумерації. З Індії вона поширилась по всьому світу. При цьому одні народи перейняли в індійців тільки принцип позначення чисел, залишивши старі начертання цифр (так було, наприклад, в Китаї), другі запозичили і написання цифр. Ми подаємо таблицю, на якій видно, як поступово видозмінювалися цифри «губар», що вживалися в маврітанських державах, поки вони не набрали сучасної форми. Звідки походять самі цифри «губар», досі залишається неясним.

Нова нумерація в країнах Європи була прийнята далеко не відразу. Аж до XVIII ст. в офіціальних паперах дозволялося застосовувати тільки римські цифри. Однак переваги позиційного принципу числення були настільки великі, що ще в XIII ст. його почали застосовувати італійські купці. Леонардо Пізанський — видатний учений XIII ст. — тоді ж виступив переконаним прихильником нової системи. В Німеччині, Франції і Англії до кінця XV ст. нова нумерація майже не вживалась. Але на кінець XVI — початок XVII ст.

позиційна система здобула рішучу перемогу — її прийняли не тільки купці, а й усі вчені. Її почали застосовувати повсюдно.

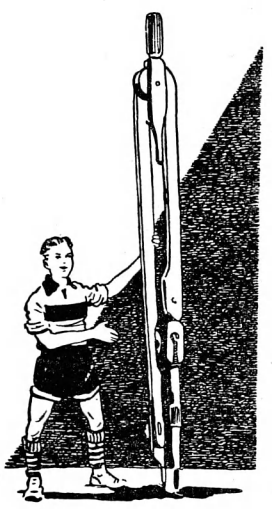
У Росії, як ми вже знаємо, за старих часів застосовувалась алфавітна система, яка має багато переваг порівняно з римською. Але й тут нова нумерація швидко ввійшла в ужиток: в усіх без винятку математичних рукописах XVII ст. застосовувалась десяткова позиційна система числення. При Петрі I індійські цифри вже витісняють на монетах слов'янські, а в післяпетровські часи слов'янські цифри взагалі швидко зникають з ужитку.

Наведемо на закінчення слова видатного французького математика і фізика XVIII—XIX століть Лапласа: «Думка зображати всі числа дев'ятьма знаками, надаючи їм, крім значення за формою, ще значення за місцем, настільки проста, що саме через цю простоту важко зрозуміти, наскільки вона чудова. Як нелегко було прийти до цього методу, ми бачимо на прикладі найбільших геніїв грецької вченості Архімеда та Аполлонія, від яких ця думка залишилася прихованою».

НАЙПРОСТІШІ НЕОЗНАЧЕНІ РІВНЯННЯ

ПІФАГОРОВІ ТРИКУТНИКИ

Футбольне поле — це прямокутна площадка завдовжки 90 *м* і завширшки 60 *м*. Як розмітити таку площадку? Прямокутник на аркуші паперу будують за допомогою лінійки і циркуля або лінійки і косинця. Ці прилади надто малі для роботи на місцевості. Вони не забезпечать потрібної точності в побудові прямих кутів такої площадки, як футбольне поле. Коли ж зробити лінійку, циркуль і косинець досить великих розмірів, то ними не можна буде користуватися.

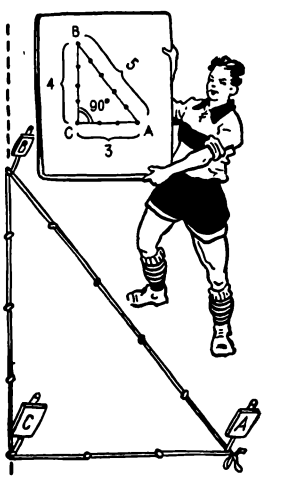


Для побудови прямокутної площадки слід було б узяти косинець і циркуль таких розмірів.

З давніх часів відомий дуже простий спосіб побудови на місцевості прямих кутів. Виконаємо таку побудову. Візьмемо шнур і три кілочки. На шнурі позначимо 12 рівних часток. Потім вузлами виділимо три частини шнура MB, BC і CN так, щоб перша частина складалася з п'яти, друга з чотирьох і остання з трьох таких часток. Вузли M і N зв'яжемо разом і позначимо цей вузол через A.

З допомогою кілочків натягнемо частину шнура BC уздовж даної прямої так, щоб точка C збіглася з точкою, через яку має бути проведений перпендикуляр до даної прямої. Потім відтягнемо шнур за вузол A так, щоб ділянки AB і AC стали прямолінійними, і заб'ємо в точці, де перебуватиме вузол A, кілочок. Задача побудови на місцевості прямого кута розв'язана, бо кут ACB прямий.

Щоб переконатися в цьому, доведемо, що прямокутним буде всякий трикутник, сторони якого, виміряні якою-небудь лінійною одиницею вимірювання, виражаються числами 3, 4 і 5. Для доведення візьмемо прямокутний трикутник з катетами, що дорівнюють двом меншим сторонам даного трикутника, і знайдемо його гіпотенузу x. За теоремою Піфагора $x^2 = 3^2 + 4^2$. Тому $x = 5$. Таким чином, три сторони даного трикутника відповідно дорівнюють трьом сторонам прямокутного трикутника. А звідси виходить, що і даний трикутник — прямокутний.



Побудова прямого кута на місцевості.

Доведена властивість трикутника з сторонами 3, 4 і 5 була, мабуть, відома ще старовинним єгипетським землемірам. Тому такий трикутник і називається єгипетським. Усякий цілочисловий трикут-

ник[1], подібний до єгипетського, також прямокутний. Чи існують інші цілочислові прямокутні трикутники? Якщо катети і гіпотенузу якого-небудь цілочислового прямокутного трикутника позначити буквами x, y і z, то за теоремою Піфагора дістанемо:

$$x^2 + y^2 = z^2. \qquad (1)$$

Виявляється, що й навпаки, якщо x, y і z — натуральні числа, які задовольняють рівняння (1), то трикутник з сторонами x, y і z — прямокутний. Цілочисловий прямокутний трикутник для короткості іноді називають піфагоровим.

Наше міркування показує, що задача знаходження всіх піфагорових трикутників зводиться до розв'язання рівняння (1) в натуральних числах. Але розв'язуванням цього рівняння ми займемося трохи пізніше, а зараз розглянемо кілька інших задач.

КУПІВЛЯ КВИТКА В МЕТРО І РОЗМІН ПОЛТИНИКА

На автоматі по продажу квитків у метро можна зустріти такий напис:

«Опустіть 5 коп. монетами:

5
3 + 2
3 + 1 + 1
2 + 2 + 1
2 + 1 + 1 + 1
1 + 1 + 1 + 1 + 1».

Чи всі можливі способи заплатити 5 коп. без здачі передбачили конструктори автомата?

Цю задачу розв'язати зовсім не важко. Ми розглянемо більш складну задачу.

Скількома способами можна розміняти полтиник монетами вартістю в 10, 15 і 20 коп.?

Припустимо, що кілька монет вартістю в 20, 15 і 10 коп. становлять суму в 50 коп. При цьому умовимося вважати, що число монет якої-небудь вартості дорівнює нулеві, якщо монети даної вартості не входять до суми. Позначаючи через x, y і z відповідно число монет в 20, 15 і 10 коп., які входять у цю суму, дістанемо рівняння:

$$20x + 15y + 10z = 50. \qquad (2)$$

[1] Цілочисловим трикутником називають трикутник, довжини сторін якого виражаються цілими числами.

Таким чином, кожному способові розміняти полтиник монетами вартістю в 20, 15 і 10 коп. відповідає один розв'язок рівняння (2) в невід'ємних цілих числах. Легко бачити, що й навпаки — кожному розв'язкові x, y, z рівняння (2) в невід'ємних цілих числах відповідає певний спосіб розміну полтиника монетами вартістю в 20, 15 і 10 коп. Тому задача відшукання всіх таких способів розміну полтиника зводиться до знаходження всіх розв'язків рівняння (2) в невід'ємних цілих числах.

Скільки монет слід опустити в автомат, щоб купити квиток?

ЗВАЖУВАННЯ ВАНТАЖУ НА ШАЛЬКОВИХ ТЕРЕЗАХ

Чи можна 28 $Г$ певної речовини зважити на шалькових терезах, маючи гирі вагою тільки в 3 і 5 $Г$?

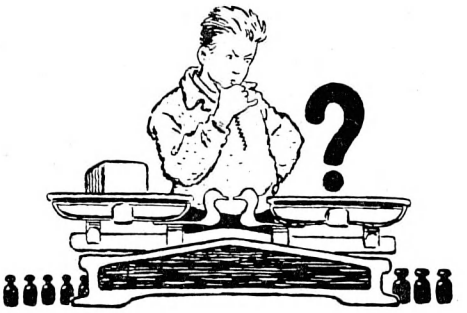
Виявляється, це можна зробити навіть кількома способами.

Спробуємо знайти всі способи зважування. Для цього покладемо вантаж в 28 $Г$ на праву шальку терезів і зрівноважимо його гирями вагою в 3 і 5 $Г$. Можливі такі випадки: а) всі гирі містяться на лівій шальці терезів; б) гирі по 3 $Г$ містяться на лівій шальці терезів, а гирі по 5 $Г$ разом з вантажем містяться на правій шальці терезів; в) гирі по 5 $Г$ містяться на лівій шальці терезів, а гирі по 3 $Г$ разом з вантажем містяться на правій шальці терезів.

Якщо через x позначити число використаних гир вагою в 3 $Г$, а через y — число використаних гир вагою в 5 $Г$, то відповідно до наведених вище випадків дістанемо:

$$\begin{aligned} &\text{а)}\ 3x + 5y = 28; \qquad (3)\\ &\text{б)}\ 3x = 28 + 5y \text{ або } 3x - 5y = 28;\\ &\text{в)}\ 5y = 28 + 3x \text{ або } 5y - 3x = 28. \end{aligned}$$

Щоб знайти всі способи зважування, треба розв'язати кожне з цих рівнянь у невід'ємних цілих числах, або, що те саме, розв'язати рівняння (3) в цілих числах. Треба при цьому мати на увазі, що значення невідомих x і y



Скільки треба взяти гир?

вказують не тільки на число використаних гир, а й на їх місце на шальках терезів. Так, якщо значення невідомого x додатне, то число гир вагою в 3 $Г$ дорівнює x, і всі вони містяться на лівій шальці терезів; якщо значення невідомого x від'ємне, то число гир вагою в 3 $Г$ дорівнює $-x$, і всі вони містяться на правій шальці терезів.

НЕОЗНАЧЕНІ РІВНЯННЯ

Кожна з розглянутих задач зводиться, як ми переконалися, до розв'язання в цілих числах деякого рівняння, що містить більше одного невідомого. Такі рівняння називають *неозначеними*. При розв'язуванні неозначених рівнянь звичайно шукають значення невідомих, що задовольняють ті чи інші арифметичні умови. Наприклад, їх розв'язують у цілих або в раціональних числах.

Ще александрійський математик Діофант (III ст. н. е.) займався розв'язуванням алгебраїчних неозначених рівнянь в раціональних числах. Розв'язуванням неозначених рівнянь у цілих числах уперше почали займатися вчені Індії. Вони запропонували загальний метод для розв'язування в цілих числах неозначених рівнянь першого степеня з цілими коефіцієнтами, а також знайшли розв'язки в цілих числах деяких неозначених рівнянь другого степеня з двома невідомими.

РАЦІОНАЛЬНІ І ЦІЛІ РОЗВ'ЯЗКИ НЕОЗНАЧЕНИХ РІВНЯНЬ ПЕРШОГО СТЕПЕНЯ. МЕТОД РОЗСІЮВАННЯ

Розв'язати неозначене рівняння першого степеня з цілими коефіцієнтами в раціональних числах неважко. Візьмемо, наприклад, рівняння

$$29x - 13y = 17. \qquad (4)$$

Щоб знайти всі розв'язки цього рівняння, дізнаємося, при яких раціональних значеннях одного невідомого відповідне значення другого невідомого раціональне. Кожному значенню невідомого x відповідає єдине значення невідомого y, що визначається з формули

$$y = \frac{29x - 17}{13}. \qquad (5)$$

Якщо значення невідомого x раціональне, то і значення невідомого y, одержуване з формули (5), раціональне.

Для знаходження цілих розв'язків рівняння (4) ми не можемо безпосередньо скористатися формулою (5), бо при цілих значеннях одного невідомого друге невідоме не обов'язково набуває цілих значень. Щоб знайти всі цілі розв'язки рівняння (4), будемо шукати такі значення невідомого x, для яких відповідні значення невідомого y — цілі числа. Ця незначна на перший погляд зміна постановки задачі відкриває шлях для її розв'язання.

Беручи до уваги, що $\frac{29}{13} = 2 + \frac{3}{13}$, а $\frac{17}{13} = 1 + \frac{4}{13}$, ми, користуючись формулою (5), дістанемо:

$$y = 2x - 1 + \frac{3x - 4}{13}. \qquad (6)$$

Ми повинні дізнатися, при яких цілих значеннях невідомого x невідоме y набуває цілих значень. Через те що при цілому x число $2x - 1$ є цілим, то з формули (6) виходить, що невідоме y при цілому x тільки в тому випадку набуває цілого значення, якщо вираз $\frac{3x - 4}{13}$ є ціле число. Наша задача ще не розв'язана, але ми наблизилися до мети.

Справді, покладаючи

$$\frac{3x - 4}{13} = y_1,$$

ми помічаємо, що питання, при яких цілих значеннях невідомого x невідоме y_1 набуває цілих значень, рівносильне питанню про цілі розв'язки рівняння

$$3x - 13y_1 = 4. \qquad (7)$$

Отже, розв'язування в цілих числах рівняння (4) нам удалося звести до розв'язування в цілих числах рівняння (7). Чим же друге рівняння краще за перше?

Найпростішим з неозначених рівнянь природно вважати таке, у якого хоч би один з

Будемо розв'язувати задачу методом розсіювання.

коефіцієнтів при невідомих дорівнює 1 або —1. В цьому випадку невідоме з таким коефіцієнтом при будь-яких цілих значеннях інших невідомих набуває цілих значень. Тому чим менша найменша з абсолютних величин коефіцієнтів при невідомих, тим рівняння краще. В рівнянні (4) найменша з абсолютних величин коефіцієнтів при невідомих дорівнює 13, а в рівнянні (7) ця величина дорівнює 3. Як вдалося досягти цього? Коефіцієнт при невідомому x і вільний член рівняння були замінені остачею від ділення цих чисел на 13. Але остача від ділення цілого числа на натуральне число завжди менша від цього натурального числа. Зрозуміло тепер, чому з самого початку невідоме y було виражене через невідоме x: ми вибрали невідоме з найменшим за абсолютною величиною коефіцієнтом. Ми набули певного досвіду і можемо тепер сміливо взятися за рівняння (7).

При яких цілих значеннях невідомого y_1 невідоме x набуває цілих значень?

З рівності

$$x = \frac{4 + 13y_1}{3} = 1 + 4y_1 + \frac{1 + y_1}{3} \qquad (8)$$

знаходимо, що невідоме x при цілих значеннях невідомого y_1 тільки тоді набуває цілих значень, коли $\frac{1 + y_1}{3}$ — ціле число. Позначаючи через x_1 цей вираз, дістанемо: $1 + y_1 = 3x_1$, або

$$3x_1 - y_1 = 1. \qquad (9)$$

Таким чином, задачу зведено до розв'язання в цілих числах рівняння (9). Але розв'язати в цілих числах рівняння (9) означає дізнатися, при яких цілих значеннях невідомого x_1 невідоме y_1 також набуває цілих значень. Але $y_1 = 3x_1 - 1$, тому y_1 набуває цілих значень при будь-яких цілих значеннях невідомого x_1. Тепер з рівностей (8) і (6) послідовно знайдемо вирази для невідомих x і y:

$$x = 1 + 4(3x_1 - 1) + x_1 = 13x_1 - 3;$$
$$y = 2 \cdot (13x_1 - 3) - 1 + 3x_1 - 1 = 29x_1 - 8.$$

З наведених міркувань виходить, що

$$x = 13x_1 - 3,$$
$$y = 29x_1 - 8$$

при $x_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$ дають всі цілі розв'язки рівняння (4).

Так само можна зробити і в тому разі, коли число невідомих в неозначеному рівнянні першого степеня більше двох. Для цього треба вибрати невідоме з найменшим (за абсолютною величиною) коефіцієнтом і поставити питання, при яких цілих значеннях інших невідомих вибране невідоме набуває цілих значень. Легко догадатися, як діяти далі. Описаний метод розв'язування неозначених рівнянь в цілих числах неістотно відрізняється від методу, запропонованого індійцями. У зв'язку з тим, що при розв'язуванні неозначеного рівняння за цим методом воно зводиться до ланцюжка рівнянь, коефіцієнти яких дедалі зменшуються, індійські математики назвали цей метод методом розсіювання.

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ НА ЗВАЖУВАННЯ

Отже, нам треба розв'язати в цілих числах рівняння (3). Визначаємо невідоме x:

$$x = \frac{28 - 5y}{3} = 9 - y + \frac{1 - 2y}{3}.$$

Справедлива і така рівність:

$$x = 9 - 2y + \frac{1 + y}{3}.$$

Нею ми і скористуємося. Адже наша мета полягає в тому, щоб зменшити коефіцієнт при y. Введемо позначення:

$$x_1 = \frac{1 + y}{3}.$$

Задачу зведено до розв'язання в цілих числах рівняння

$$3x_1 - y = 1.$$

Розв'язуючи це рівняння, дістанемо:

$$y = 3x_1 - 1,$$

де x_1 — будь-яке ціле число. А тоді

$$x = 9 - 2 \cdot (3x_1 - 1) + x_1 = 11 - 5x_1.$$

Задачу на зважування розв'язано!

Таким чином, загальний розв'язок рівняння (3) можна записати так:

$$x = 11 - 5x_1,$$
$$y = 3x_1 - 1,$$

де $x_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$

Знайдемо кілька розв'язків цього рівняння, що відповідають значенням невідомого $x_1 = 0, 1, -1, 2, -2, 3, -3$:

x_1	0	1	—1	2	—2	3	—3
x	11	6	16	1	21	—4	26
y	—1	2	—4	5	—7	8	—10

Рівняння (3) має безліч розв'язків, але скористатися ми зможемо тільки деякими з них. Це залежить від числа гир, які є в нашому розпорядженні, та й від розмірів шальок.

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ ПРО КУПІВЛЮ КВИТКА В МЕТРО І ЗАДАЧІ ПРО РОЗМІН ПОЛТИНИКА

Розв'яжемо рівняння (2) у невід'ємних цілих числах. Спочатку знайдемо всі цілі розв'язки цього рівняння. Поділивши обидві частини рівняння на 5, дістанемо:

$$4x + 3y + 2z = 10.$$

З цієї рівності знаходимо:

$$z = \frac{10 - 4x - 3y}{2} = 5 - 2x - y - \frac{y}{2}.$$

Звідси виходить, що невідоме z при цілих значеннях невідомих x і y також набуває цілих значень тільки тоді, коли число $\frac{y}{2}$ ціле, тобто коли число y парне. Покладаючи $y = 2a$, дістанемо:

$$z = 5 - 2x - 3a.$$

Ми знайдемо всі цілі розв'язки рівняння (2), надаючи параметрам x і a у формулах

$$\begin{aligned} x &= x, \\ y &= 2a, \\ z &= 5 - 2x - 3a \end{aligned} \qquad (10)$$

всіх можливих цілих значень. Нас цікавлять тільки невід'ємні розв'язки рівняння (2), тому ми повинні знайти такі цілі значення параметрів x і a, при яких невідомі x, y і z, що визначаються з формул (10), набувають невід'ємних значень. Для цього треба розв'язати в цілих числах систему нерівностей:

$$x \geqslant 0,\ 2a \geqslant 0,\ 5 - 2x - 3a \geqslant 0,$$

або

$$a \geqslant 0,\ 0 \leqslant x \leqslant \frac{5 - 3a}{2}.$$

Неважко зрозуміти, що a може набувати двох значень: 0 і 1. Якщо $a = 0$, то x може набувати одного з трьох значень: 0, 1 або 2. Якщо ж $a = 1$, то x може набувати лише значення 0 чи 1.

Отже, рівняння (2) має тільки 5 розв'язків у невід'ємних цілих числах, і, отже, полтиник можна розміняти монетами вартістю в 20, 15 і 10 копійок тільки такими п'ятьма способами:

$50 = 10 + 10 + 10 + 10 + 10;$
$50 = 20 + 10 + 10 + 10;$
$50 = 20 + 20 + 10;$
$50 = 15 + 15 + 10 + 10;$
$50 = 15 + 15 + 20.$

Задачу про купівлю квитка в метро можна звести до розв'язання в цілих невід'ємних числах неозначеного рівняння

$$5x + 3y + 2z + u = 5.$$

А втім, число способів купівлі квитка в метро монетами вартістю в 5, 3, 2 і 1 коп. найпростіше визначити безпосереднім підбором.

Квитка куплено.

Ми розглянули кілька рівнянь першого степеня. Кожне з них, як нам вдалося встановити, має цілочислові розв'язки. Однак поряд з ними можна вказати рівняння, які розв'язків у цілих числах не мають. Це, наприклад, рівняння

$$3x - 6y = 5. \qquad (11)$$

Справді, припустивши, що при деяких цілих x і y рівність (11) справедлива, ми дістанемо, що 5 ділиться на 3.

Які неозначені рівняння можна розв'язати в цілих числах?

У чому полягає умова розв'язності таких рівнянь?

Якщо деяке неозначене рівняння першого степеня має розв'язки в цілих числах, то чи завжди можна знайти ці розв'язки методом розсіювання?

Відповідь на перше запитання дає така теорема:

Рівняння з цілими коефіцієнтами

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \ldots + a_nx_n = b \qquad (12)$$

розв'язне в цілих числах тільки в тому випадку, якщо вільний член b ділиться на найбільший спільний дільник чисел $a_1, a_2, \ldots, a_n$. Тут $a_1, a_2, \ldots, a_n, b$ — цілі числа.

З метою економії місця ми не подаємо доведення цієї теореми, хоч воно і елементарне.

Дамо відповідь на друге запитання: чи завжди запропонований метод розв'язування рівняння першого степеня в цілих числах приводить до успіху?

Ідея методу полягає в заміні даного рівняння рівносильним йому рівнянням, у якого абсолютна величина коефіцієнтів менша від абсолютних величин коефіцієнтів заданого рівняння.

Якщо a_1 — найменший за абсолютною величиною коефіцієнт при невідомих рівняння (12), то ми заміняємо це рівняння іншим, в якому всі коефіцієнти, крім коефіцієнта при невідомому x_1, замінені остачами від ділення цих коефіцієнтів на a_1. Якщо хоч би один з коефіцієнтів $a_2, a_3, \ldots, a_n$ не ділиться без остачі на a_1, то ми дістанемо рівняння з меншими (у згаданому розумінні) коефіцієнтами. З цим рівнянням робимо так само, як з даним. Якщо ж всі числа $a_2, a_3, \ldots, a_n$ діляться на a_1, то і b ділиться на a_1 (у випадку розв'язності в цілих числах даного рівняння). Ділячи в цьому випадку обидві частини рівняння на a_1, ми дістанемо рівняння, цілі розв'язки якого знаходимо легко.

Описаний метод в разі розв'язності рівняння в цілих числах завжди дозволяє знайти цілі розв'язки цього рівняння.

НЕОЗНАЧЕНІ СИСТЕМИ РІВНЯНЬ ПЕРШОГО СТЕПЕНЯ

При розв'язуванні в цілих числах неозначених систем рівнянь першого степеня з цілими коефіцієнтами, тобто таких систем рівнянь, у яких число невідомих більше від числа рівнянь, звичайно користуються методом послідовного виключення невідомих.

Розв'яжемо, наприклад, в цілих числах таку систему рівнянь:

$$3x + 5y - 7z = 15,$$
$$2x + 3y - 9z = 12.$$

Спочатку візьмемо перше рівняння і знайдемо, при яких цілих значеннях невідомих y і z невідоме x набуває цілих значень. Дістаємо:

$$x = \frac{15 - 5y + 7z}{3} = 5 - 2y + 2z + \frac{y + z}{3}.$$

Нехай

$$\frac{y + z}{3} = x_1.$$

Звідси виходить, що

$$z = 3x_1 - y$$

і

$$x = 5 - 2y + 2(3x_1 - y) + x_1 = 5 - 4y + 7x_1.$$

Знайдені значення невідомих x і z підставляємо в друге рівняння:

$$2(5 - 4y + 7x_1) + 3y - 9(3x_1 - y) = 12.$$

Після зведення подібних членів дістанемо таке рівняння:

$$4y - 13x_1 = 2.$$

Розв'яжемо його в цілих числах:

$$y = \frac{2 + 13x_1}{4} = 3x_1 + \frac{2 + x_1}{4},$$

$$y_1 = \frac{2 + x_1}{4},$$

$x_1 = 4y_1 - 2$ і $y = 3(4y_1 - 2) + y_1 = 13y_1 - 6$.

Таким чином, всі цілі розв'язки даної системи рівнянь можна дістати з формул:

$$x = 5 - 4(13y_1 - 6) + 7(4y_1 - 2) = 15 - 24y_1;$$

$$y = 13y_1 - 6;$$

$$z = 3(4y_1 - 2) - 13y_1 + 6 = -y_1,$$

де y_1 — ціле число.

До систем неозначених рівнянь першого степеня зводяться, наприклад, задачі на знаходження чисел, які дають при діленні на дані цілі числа задані остачі.

РАЦІОНАЛЬНІ РОЗВ'ЯЗКИ НЕОЗНАЧЕНИХ РІВНЯНЬ СТЕПЕНЯ ВИЩЕ ПЕРШОГО

Розв'язування таких рівнянь — завдання незрівнянно важче, ніж розв'язування в раціональних числах неозначених рівнянь першого степеня. Ознайомимося з розв'язуванням у раціональних числах рівняння

$$x^2 + y^2 = 1. \qquad (13)$$

Той же метод можна застосувати до розв'язування в раціональних числах рівнянь виду

$$ax^2 + y^2 = 1,$$

де a — будь-яке дане раціональне число, а також до розв'язування деяких інших рівнянь. Цей метод підказав Діофант[1].

Якщо (x, y) є раціональний розв'язок рівняння (13), то $(-x, y)$, $(-x, -y)$ і $(x, -y)$ — розв'язки того ж рівняння. З цієї четвірки розв'язків принаймні один є розв'язком даного рівняння у невід'ємних раціональних числах. Рівняння (13) має розв'язки (0, 1), (0, —1), (1, 0) і (—1, 0), а у всіх інших розв'язках цього рівняння значення обох невідомих не дорівнюють нулеві. Із сказаного виходить, що, знайшовши всі розв'язки рівняння (13) в додатних раціональних числах, ми зможемо негайно вказати і всі раціональні розв'язки цього рівняння. Щоб знайти всі розв'язки рівняння (13) в додатних раціональних числах, дізнаємося, для яких додатних і раціональних значень невідомого x число $\sqrt{1 - x^2}$ раціональне[2].

Це число подамо в такому вигляді:

$$\sqrt{1 - x^2} = 1 - tx, \qquad (14)$$

де t — деяке раціональне число. Тоді питання про раціональні значення невідомого x, для яких число $\sqrt{1 - x^2}$ раціональне, зводиться до питання про те, для яких значень x справедлива рівність (14). Для того щоб відповісти на це запитання, розв'яжемо таке рівняння:

$$1 - x^2 = (1 - tx)^2,$$

$$1 - x^2 = 1 - 2tx + t^2x^2,$$

$$(1 + t^2)x = 2t,$$

$$x = \frac{2t}{1 + t^2}.$$

Ці викладки можна провести і в зворотному порядку. Отже, рівність (14) можлива тільки в тому випадку, якщо $x = \frac{2t}{1 + t^2}$. З цієї рівності виходить, що для раціональних t раціональне і x. Тому число $\sqrt{1 - x^2}$ раціональне для раціональних значень невідомого x, якщо $x = \frac{2t}{1 + t^2}$, де t — раціональне число. Але

$$1 - tx = \frac{1 - t^2}{1 + t^2},$$

тому всякий розв'язок рівняння (13) можна дістати, користуючись формулами:

$$x = \frac{2t}{1 + t^2} \quad \text{і} \quad y = \frac{1 - t^2}{1 + t^2}.$$

Неважко зрозуміти, що всі розв'язки рівняння (13) в додатних раціональних числах ми дістанемо, якщо примусимо параметр t набувати всіх додатних раціональних значень між 0 і 1.

Особливо важким виявилося розв'язування в раціональних числах рівнянь вище другого степеня. Досі, наприклад, не знайдено елементарного доведення теореми про те, що рівняння $x^3 + y^3 = 1$ не має розв'язків у додатних раціональних числах.

[1] Цікаво, що ідея цього методу використовується при обчисленні деяких інтегралів (див. статтю «Інтеграл і похідна»).

[2] Символом $\sqrt{\ }$ ми позначаємо арифметичний корінь.

ЦІЛІ РОЗВ'ЯЗКИ НЕОЗНАЧЕНИХ РІВНЯНЬ СТЕПЕНЯ ВИЩЕ ПЕРШОГО

Розв'язання в цілих числах неозначених рівнянь степеня вище першого з цілими коефіцієнтами — у багатьох випадках задача значно складніша, ніж розв'язування таких же рівнянь у раціональних числах.

Індійські математики (V—XII століть) розв'язали в цілих числах деякі рівняння другого степеня з двома невідомими. Завдання розв'язання в цілих числах неозначених рівнянь другого степеня з двома невідомими повністю розв'язав французький математик Лагранж (1736—1813).

Рівняння третього степеня з двома невідомими досі до кінця не досліджені. З деякими типами таких рівнянь вдалося справитися радянському математикові Б. М. Делоне. Треба сказати, що навіть встановити число розв'язків таких рівнянь третього і вищих степенів надзвичайно важко.

На початку нашого століття норвезькому математикові Акселю Туе вдалося довести цікаву теорему: *Неозначене рівняння з цілими коефіцієнтами*

$$a_0x^n + a_1x^{n-1}y + a_2x^{n-2}y^2 + \ldots + a_ny^n = b,$$

де n — ціле число, більше двох, має тільки скінченну множину розв'язків (як окремий випадок — не має розв'язку) в цілих числах, крім випадків, коли ліва частина цього рівняння є степінь однорідного двочлена першого степеня або тричлена другого степеня.

Ще важчим є питання про розв'язання в цілих числах неозначених рівнянь вище першого степеня з більш як двома невідомими. Досі невідомий загальний метод розв'язування таких рівнянь. Рівняння (1) є найпростішим з таких рівнянь. Якщо a, b, c — розв'язок цього рівняння в натуральних і взаємно простих числах, то $\frac{a}{c}$, $\frac{b}{c}$ є розв'язок рівняння (13) в додатних раціональних числах. Тому $\frac{a}{c} = \frac{2t}{1+t^2}$ і $\frac{b}{c} = \frac{1-t^2}{1+t^2}$, де t — деяке раціональне число, що задовольняє умову $0 < t < 1$. Зробимо заміну, покладаючи $t = \frac{n}{m}$, де n і m — цілі числа. Ці числа ми можемо вважати взаємно простими і навіть натуральними, підпорядкованими умові $n < m$, бо $0 < t < 1$. Тому

$$\frac{a}{c} = \frac{2mn}{m^2+n^2} \text{ і } \frac{b}{c} = \frac{m^2-n^2}{m^2+n^2}.$$

У лівій частині першої рівності стоїть нескоротний дріб, бо коли числа a і c мають спільного простого дільника, то і число b ділиться на цього дільника. В правій частині цієї рівності стоїть або нескоротний дріб, або дріб, чисельник і знаменник якого діляться на 2, але не діляться на більше число. Справді, в противному разі яке-небудь просте число p ділить хоч би одне з цілих чисел m або n і знаменник цього дробу, тобто $m^2 + n^2$. А тоді і друге ділиться на p. Таким чином, числа m і n мають спільного дільника p. А це суперечить умові про те, що числа m і n взаємно прості. Зауважимо далі, що число 2 тоді тільки може бути спільним дільником чисельника і знаменника першого дробу, коли m і n — непарні числа. Якщо два нескоротних дроби з натуральними числами в ролі чисельника і знаменника дорівнюють один одному, то чисельники і знаменники цих дробів також дорівнюють один одному. Тому $a = 2mn$, $c = m^2 + n^2$ у першому випадку і $a = mn$, $c = \frac{1}{2}(m^2 + n^2)$ у другому випадку. З другої рівності відповідно дістанемо: $b = m^2 - n^2$ і $b = \frac{1}{2}(m^2 - n^2)$. Таким чином, в першому випадку розв'язок рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$a = 2mn,\ b = m^2 - n^2,\ c = m^2 + n^2,$$

де натуральні числа m і n взаємно прості і задовольняють умову $n < m$.

У другому випадку розв'язок рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$a = mn,\ b = \frac{1}{2}(m^2 - n^2),\ c = \frac{1}{2}(m^2 + n^2),$$

де m і n — непарні взаємно прості натуральні числа, причому $n < m$.

Через те що в цих формулах з чисел a і b одне парне, а друге непарне, а невідомі x і y у рівнянні (1) рівноправні, то при знаходженні тих розв'язків рівняння (1), у яких значення невідомого x парне, ми можемо користуватися формулами:

$$x = 2mn,\ y = m^2 - n^2,\ z = m^2 + n^2, \quad (15)$$

де m і n — взаємно прості натуральні числа різної парності і $n < m$. Справді, не тільки будь-який розв'язок рівняння (1) в натуральних і взаємно простих числах можна дістати з формул (15), але й при будь-яких значеннях n і m, що задовольняють вказані умови, ми діставатимемо такі розв'язки.

Користуючись формулами (15), знайдемо кілька розв'язків рівняння (1), надаючи параметрам m і n невеликих значень:

m	2	3	4	4	5	5
n	1	2	1	3	2	4
$x = 2mn$	4	12	8	24	20	40
$y = m^2 - n^2$	3	5	15	7	21	9
$z = m^2 + n^2$	5	13	17	25	29	41

Займаючись неозначеними рівняннями, відомий французький математик П'єр Ферма (1601—1665) висловив припущення, що для будь-якого натурального числа n, більшого 2, рівняння

$$x^n + y^n = z^n$$

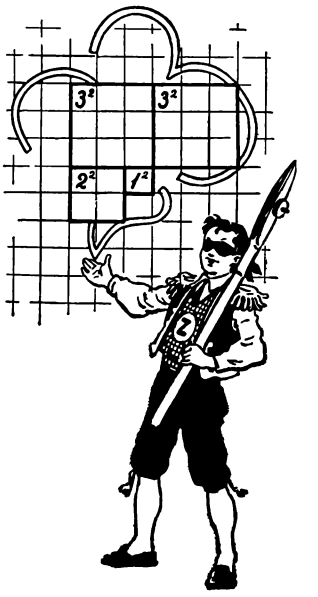
не має розв'язків у натуральних числах. Доведення цього твердження для $n = 3$ і $n = 4$ було знайдено Л. Ейлером. У дальшому робилися численні спроби довести це твердження повністю, але вони не мали успіху[1]. Однак такі спроби не були марні — вони сприяли виникненню і розвитку нового відділу математики — алгебраїчної теорії чисел.

У 1770 р. шотландський математик Варінг висловив припущення, що для всякого натурального k, яке не дорівнює 1, існує таке натуральне число r, що при будь-якому натуральному N рівняння

$$x_1^k + x_2^k + \ldots + x_r^k = N \qquad (16)$$

розв'язне в цілих невід'ємних числах. Доведення окремого випадку цього твердження належить Лагранжу. Він установив, що всяке ціле число можна подати у вигляді суми чотирьох квадратів цілих невід'ємних чисел. Наприклад:

$$23 = 3^2 + 3^2 + 2^2 + 1^2,$$
$$26 = 4^2 + 3^2 + 1^2 + 0^2.$$



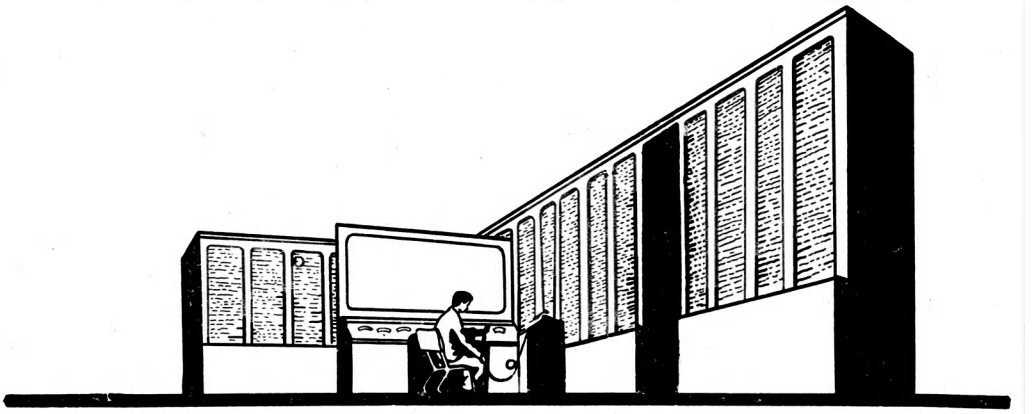
Повністю цю теорему вдалося довести в 1909 р. німецькому математикові Гільберту. Але йому не вдалося зробити оцінку числа r, тобто вказати, яке мале може бути це число. Точне значення найменшого r, для якого при будь-якому N рівняння (16) розв'язне в цілих невід'ємних числах, стало можливим визначити тільки після створення радянським математиком І. М. Виноградовим особливого методу для розв'язання цієї і схожих з нею задач.

Зовсім недавно почали вивчатися показникові неозначені рівняння. До цієї галузі належить цікава теорема радянського математика О. Й. Гельфонда:

Рівняння $a^x + b^y = c^z$, де a, b і c — цілі, кожне з яких не дорівнює 0 і степеню двійки, може мати не більш як скінченне число розв'язків у цілих числах x, y і z.

Найважчими є неозначені рівняння, зв'язані якимсь чином з простими числами. Але й у цій галузі за останні роки намітився успіх. Ми не будемо спинятися тут на складній і захоплюючій проблемі простих чисел. Докладніше з нею можна ознайомитися з книг, зазначених у бібліографічному довіднику з математики (стор. 221—224).

[1] У 1955 р., застосувавши швидкодіючі обчислювальні машини, вчені США встановили справедливість припущення Ферма для всіх $n < 4003$.



Культура лічби і наближені обчислення

ЧИ ДОБРЕ ВИ ЛІЧИТЕ?

(прийоми культурної лічби в арифметиці і в алгебрі)

Лічити доводиться скрізь: лічать у трамваї і магазині, вдома і на виробництві, в бухгалтерії установи і в банку. Складними обчисленнями супроводиться робота конструктора, який проектує машини, і вченого, що визначає елементи руху штучного супутника Землі.

Одночасно з удосконаленням методів наукового дослідження обчислювальна математика дедалі більше і чимраз глибше охоплює всі сторони різноманітної діяльності людини. Саме обчисленнями астроном, інженер, учений перевіряє у більшості випадків своє наукове завбачення, підтверджує або відкидає створені ним гіпотези. Зараз, як і багато років тому, з тією ж переконливістю звучать мудрі слова Лейбніца: «Не будемо сперечатися, а будемо обчислювати».

Люди завжди шукали і винахідливо знаходили різні допоміжні засоби, які б полегшували обчислювальну роботу. Від відомої усім російської рахівниці, від спеціальних друкованих таблиць, якими широко користуються і в школі, від арифмометра і логарифмічної лінійки до сучасних електронних обчислювальних машин — ось той шлях, який пройшла обчислювальна техніка за порівняно короткий час. В нашій країні створені і знову створюються «обчислювальні центри» — фабрики механізованої лічби, оснащені чудесними «розумними» машинами, які заміняють працю багатьох сотень математиків-обчислювачів.

Рахівниця — найпоширеніший обчислювальний прилад.

Може виникнути думка, що з появою механічних засобів лічби зникає необхідність у звичайній, простій лічбі і, зокрема, в усній лічбі. Думати так було б глибокою помилкою: допомога різних допоміжних засобів не може задовольнити всі і всякі потреби в лічбі, що зустрічаються в побуті і в повсякденній роботі. Так само як найсучасніший універсальний верстат не звільняє робітника від необхідності взятися іноді за молоток і зубило, так і лічильний прилад або таблиця не звільняють обчислювача від найзвичайнісінької лічби. Більш того, дуже часто найбільш зручна і надійна обчислювальна робота полягає в умілому поєднанні обчислень на приладі з допоміжним підрахунком «у думці».

Оволодіння навичками усної лічби потребує насамперед переборення своєрідної боязкості, що часто спостерігається перед усними обчисленнями та перетвореннями, і постійного нагромадження досвіду роботи «в думці». Досвід і «смак» до усної роботи — запорука успіху: саме вони виховують ту зосередженість уваги, спостережливість, наполегливість і винахідливість, без яких немислима успішна робота «в думці». Немалу користь може дати також і знання загальних принципів та деяких спеціальних прийомів усної лічби.

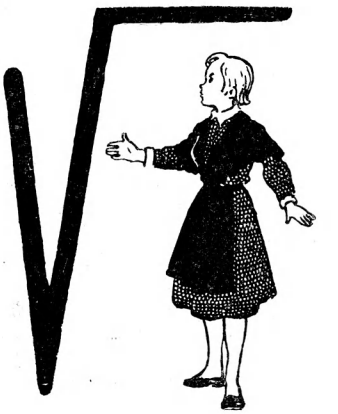
КОЛИ НЕ СЛІД КОРИСТУВАТИСЯ ШАБЛОННИМИ ПРИЙОМАМИ ОБЧИСЛЕНЬ

Говорячи про усну і напівусну лічбу, ми маємо на увазі не тільки обчислення, що зводяться до виконання арифметичних дій з кількома даними числами. Галузь застосування усної лічби значно ширша: вона охоплює і виконувані «в думці» перетворення, які відносять звичайно до алгебри. Нерідко складний числовий вираз, в якому, здається, не обійтися без громіздких письмових обчислень, насправді швидко і легко обчислюється «в думці», якщо тільки винахідливо використати деякі формули і перетворення.

Пояснимо сказане кількома прикладами.

Приклад 1. Знайти катет прямокутного трикутника, якщо другий катет дорівнює 10,5 *см*, а гіпотенуза 37,5 *см*.

Як відомо, довжина шуканого катета обчислюється за формулою $\sqrt{37{,}5^2-10{,}5^2}$. Порівняємо два можливих способи обчислення цього виразу.



Як найпростіше добути корінь?

Перший спосіб. Знаходимо $37{,}5^2 = 1406{,}25$; знаходимо $10{,}5^2 = 110{,}25$; віднімаємо $1406{,}25 - 110{,}25 = 1296$; знаходимо $\sqrt{1296} = 36$. Отже, потрібно було виконати чотири операції, причому принаймні три з них, мабуть, були виконані письмово.

Другий спосіб. Не вдаючись до безпосереднього обчислення виразу $\sqrt{37{,}5^2 - 10{,}5^2}$, спочатку перетворимо його: $\sqrt{37{,}5^2 - 10{,}5^2} = \sqrt{(37{,}5 + 10{,}5) \cdot (37{,}5 - 10{,}5)} = \sqrt{48 \cdot 27} = 4\ 3\sqrt{3 \cdot 3} = 4 \cdot 3 \cdot 3 = 36$.

Виявилося, що попереднє спрощення виразу дозволило відразу дістати остаточний результат, причому всі зазначені перетворення неважко виконати усно.

Приклад 2. Розв'яжемо таке рівняння:

$$10x^2 - 101x + 10 = 0.$$

Знову порівняємо два можливих способи розв'язування.

Перший спосіб. Діятимемо «за шаблоном», тобто негайно використаємо формулу коренів квадратного рівняння. Матимемо:

$$x = \frac{101 \pm \sqrt{101^2 - 4 \cdot 10 \cdot 10}}{20} = \frac{101 \pm \sqrt{10201 - 400}}{20} = \frac{101 \pm \sqrt{9801}}{20} = \frac{101 \pm 99}{20};$$

$$x_1 = 10; \quad x_2 = \frac{1}{10}.$$

Чи всяке квадратне рівняння треба розв'язувати за «шаблонною» формулою?

Другий спосіб. Беремо до уваги, що у рівнянні коефіцієнт при x^2 і вільний член однакові; отже, добуток коренів дорівнює одиниці, тобто корені рівняння — числа взаємно обернені. Але сума цих двох взаємно обернених чисел дорівнює $\frac{101}{10} = 10 + \frac{1}{10}$. Тепер можна відразу назвати корені: один з них 10, другий $\frac{1}{10}$.

Нам удалося розв'язати рівняння майже без обчислень; треба було лише «побачити» і використати своєрідність коефіцієнтів цього рівняння.

Приклад 3. Нехай треба обчислити добуток

$$\sqrt[3]{10} \cdot \sqrt[3]{0{,}25} \cdot \sqrt[3]{12{,}5} \cdot \sqrt[3]{32}.$$

Якщо ці числа перемножити послідовно в тому порядку, як вони записані, то виконати множення, не вдаючись до запису, буде важко. Якщо ж пригадати і застосувати переставну і сполучну властивості добутку, то множення матиме такий вигляд:

$$(\sqrt[3]{10} \cdot \sqrt[3]{12{,}5}) \cdot \left(\sqrt[3]{32} \cdot \sqrt[3]{\tfrac{1}{4}}\right) = \sqrt[3]{125} \quad \sqrt[3]{8} = 5 \cdot 2 = 10.$$

Очевидно, таке обчислення зовсім легко виконати «в думці».

Приклад 4. Знайти корені рівняння $x^2 - 17x + 52 = 0$. Звичайно, розв'язати це рівняння за формулою коренів квадратного рівняння неважко. Але якщо знову, не вдаючись до будь-яких записів, пригадати теорему Вієта і шукати такі два числа, сума яких 17, а добуток 52, то після однієї-двох спроб «в думці» можна відразу впевнено назвати корені рівняння:

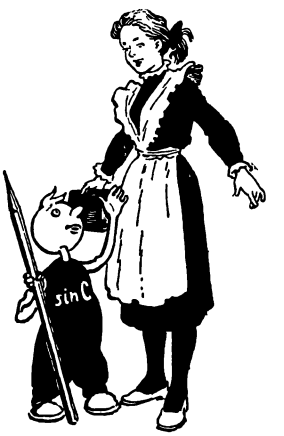
$$x_1 = 4; \quad x_2 = 13.$$

Розглянуті приклади показують, як полегшується розв'язування багатьох звичайних задач, як різко спрощуються обчислення, якщо не піддаватися спокусі відразу, без вагання скористатися звичним шаблоном, а допитливо шукати, чи не допускає запропонована задача зручного розв'язування «в думці». Що ж потрібно, щоб такі спроби були успішними? Як навчитися, не вдаючись відразу до трафаретних прийомів, знаходити там, де це можливо, такий підхід до задачі, який забезпечує найбільш «витончені» способи її розв'язання?

По-перше, звичайно, треба свідомо і твердо знати основні формули і теореми. По-друге, потрібна вдумливість, уміння бачити у звичайній на перший погляд задачі ту числову своєрідність, яку нерідко має її умова. І, по-третє, нарешті, потрібна наполегливість в шуканнях «дотепного» розв'язання запропонованої задачі, що дає змогу швидко і просто дістати потрібний результат.

ЧИ ВМІЄТЕ ВИ МІРКУВАТИ?

Звичка до міркування дає багаті плоди: вона розвиває ту особливу математичну кмітливість, яка може виручити в найрізноманітніших випадках. Іноді вона може навіть зробити несподівану послугу, дозволивши впевнено відновити частково забуту формулу.



Ось кілька прикладів.

Потрібна була формула $S = \frac{1}{2} ab \cdot \sin C$ для площі трикутника, але пам'ять «підвела»: ви забули, яка тригонометрична функція є тут множником — $\sin C$ чи $\cos C$. І ось ви міркуєте так: ця формула загальна, вона придатна для обчислення площі всякого трикутника, в тому числі і прямокутного з катетами a і b; але тоді $C = 90°$, а $\cos 90° = 0$. Тому, якщо припустити, що сумнівний множник у формулі площі $\cos C$, то площа трикутника дорівнюватиме нулеві. Явна нісенітниця! З другого боку, $\sin C = \sin 90° = 1$, і ми дістаємо $S = \frac{1}{2} ab$, тобто відому формулу для площі прямокутного трикутника. Тепер сумніву немає: тригонометричний множник у формулі — $\sin C$.

Другий приклад. Ви вагаєтесь, забувши, який вигляд має формула Герона для площі трикутника: $S = \sqrt{(p-a)(p-b)(p-c)}$ чи $S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$. І тут також просте міркування допоможе вам. Ви міркуватимете так: ліва і права частини формули повинні бути одного й того ж виміру: площа виражається в квадратних одиницях; p, $p-a$, $p-b$, $p-c$ — лінійні величини; добутки $(p-a)(p-b)(p-c)$ і $p(p-a)(p-b)(p-c)$ відповідно 3-го і 4-го виміру; квадратні

корені з цих добутків матимуть виміри $\frac{3}{2}$ і 2. Сумніву немає: правильна формула

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}.$$

Важко перелічити всі випадки, коли вміння спостерігати і вміння лічити дозволяють «на ходу» легко виявити те, що, здавалося б, обов'язково потребує письмового розрахунку. Ось, наприклад, у магазині купують $7\frac{1}{2}$ *м* тканини ціною по 13 крб. 20 коп. за метр. Продавець виписує чек; на ньому вказано 99 крб. 60 коп. Покупець, не відходячи від прилавка, буквально протягом кількох секунд впевнено встановлює, що сума, вказана в чеку, неправильна. Спробуємо простежити за ходом думки нашого спостережливого покупця.

Вартість усієї покупки, виражена в копійках, є добуток $1320 \times 7\frac{1}{2}$. Добуток не зміниться, якщо один із співмножників поділити на 10, а другий помножити на 10. Значить, вартість покупки 132×75 (копійок). Кожен із співмножників — число, кратне 3. Отже, добуток повинен бути кратним 9. Але на чеку написано 99 крб. 60 коп. = 9960 коп. — число, сума цифр якого (24) не ділиться на 9. Ця суперечність і показує, що чек виписано неправильно.

Спробуємо тепер усно підрахувати, скільки ж коштує тканина. В умові задачі ніби немає тієї числової своєрідності, яка дозволяє застосувати винахідливу усну лічбу. Насправді ж пильне око виявить і тут можливість не тільки усно підрахувати вартість покупки, а й навіть зробити це двома різними способами.

Перший спосіб. Добуток 13,2 крб. на $7\frac{1}{2}$ дорівнює добуткові 6,6 крб. на 15 (ми поділили тут перший співмножник на 2, а другий помножили на 2). Застосовуючи тепер відомий спосіб множення чисел на 15, матимемо:

$$6{,}6 \cdot 15 = 6{,}6 \cdot 10 + \frac{6{,}6 \cdot 10}{2} =$$
$$= 66 + 33 = 99 \text{ (крб.)}.$$

Скільки коштують 7,5 м?

Другий спосіб. Узявши до уваги, що $7\frac{1}{2}$ становить $\frac{3}{4}$ від 10, можемо вартість покупки в карбованцях виразити так:

$$(13{,}2 \cdot 10) \cdot \frac{3}{4} = 132 \cdot \frac{3}{4} = [(132 : 2) : 2] \cdot 3 =$$
$$= (66 : 2) \cdot 3 = 33 \cdot 3 = 99.$$

Дехто може подумати, що в розглянутих нами прикладах зручні прийоми усного розв'язування вдалося використати тільки тому, що числові дані або форма математичного виразу були спеціально підібрані. Це невірно. Вірно лише те, що різноманітні прийоми усних обчислень, якими ми користувалися, можна застосувати далеко не в усіх випадках. Так, наприклад, якщо в розглянутих раніше двох прикладах на розв'язування квадратного рівняння вдалося, минаючи формулу коренів, обійтися без записів, то це аж ніяк не означає, що майже завжди при розв'язуванні квадратних рівнянь можна обійтися без цієї формули і зв'язаних з нею письмових обчислень. Але, з другого боку, неправильно було б вважати, що різні способи легких і швидких усних обчислень та перетворень, які були тут показані, застосовні лише у виняткових, «вибраних» випадках. Набагато частіше, ніж це здається, уважне і пильне око зуміє помітити і дотепно використати числову «індивідуальність» обчислюваного виразу або своєрідність його форми.

Щоб навчитися «бачити» і винахідливо лічити, потрібні насамперед досвід, звичка до міркування і кмітливість. Для арифметичних розрахунків «у думці» велику допомогу подасть, крім того, знання загальних принципів і спеціальних прийомів, які застосовуються при усній лічбі. Вкажемо на деякі з найважливіших і найцікавіших з таких прийомів усної лічби.

У звичайній, «побутовій» лічбі (в магазині, вдома, в трамваї) і в лічбі на виробництві, коли робітник або інженер повинен зробити нескладний попередній розрахунок, здебільшого доводиться мати справу з двоцифровими і рідше з трицифровими числами. При цьому лічити найчастіше доводиться «на ходу» і досить швидко. Тому особливо важливо навчитися виконувати «в думці» дії над двоцифровими і почасти трицифровими числами. А в тих випадках, коли обчислення виконуються з досить великими числами, надійніше, та кінець кінцем і легше, виконувати такі розрахунки письмово або, якщо є можливість, на лічильних приладах.

Деякі найпростіші прийоми усної лічби розглядають в школі. Зокрема, учням звичайно пропонують усні вправи, що ілюструють, як

спрощуються обчислення при вмілому застосуванні законів арифметичних дій.

Подають також деякі найпростіші спеціальні прийоми усної лічби (множення на 5, 15, 25, 50, окремі прийоми процентних обчислень і т. д.). На них ми тут не спинятимемося і обмежимося лише такими вказівками.

ДОДАВАННЯ «В ДУМЦІ» КІЛЬКОХ ДВОЦИФРОВИХ ЧИСЕЛ

Нехай треба додати: $37 + 85 + 29 + 42$. Зробимо так: спочатку додамо всі десятки: $3 + 8 + 2 + 4$ і запам'ятаємо результат: 17. Потім додамо всі одиниці: $7 + 5 + 9 + 2$, дістанемо 23. Додавши до 17 десятків 2 десятки, дістанемо 19 десятків. Результат знайдено: 193.

Так само діємо, якщо серед доданків є трицифрові числа. Наприклад, додамо $228 + 39 + 485 + 91$. Додаємо десятки (користуючись при цьому переставною і сполучною властивостями додавання). Матимемо: $(22 + 48) + (3 + 9) = 70 + 12 = 82$. Потім додаємо одиниці: $(8 + 5) + (9 + 1) = 23$. Всього маємо 84 десятки і 3 одиниці. Сума 843.

МНОЖЕННЯ «В ДУМЦІ» ДВОЦИФРОВИХ ЧИСЕЛ

Загальним прийомом множення «в думці» двох двоцифрових чисел є множення «хрестиком» (цей прийом називають іноді індійським способом множення).

Користуючись алгеброю, розглянемо спочатку множення двох двоцифрових чисел у загальному вигляді.

Є два двоцифрових числа: $\overline{ab} = 10a + b$ і $\overline{cd} = 10c + d$, де a, b, c і d — цифри[1]. Помножимо $\overline{ab}$ на $\overline{cd}$:

$$(10a + b)(10c + d) = 100ac + 10ad + 10bc + bd = ac \cdot 100 + (ad + bc) \cdot 10 + bd.$$

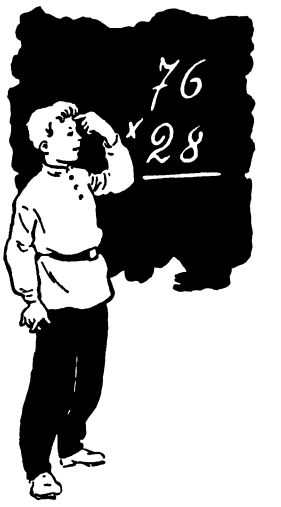
Словами цей результат можна прочитати так: добуток $\overline{ab} \cdot \overline{cd}$ містить ac сотень, $(ad + bc)$ десятків і bd одиниць. Якщо $bd \geqslant 10$, тобто bd містить десятки, то їх додають до $(ad + bc)$ десятків, а якщо утворене число десятків містить сотні, то їх додають до ac сотень.

[1] $\overline{ab}$ — двоцифрове число, в якому a — цифра десятків і b — цифра одиниць; ab (без риси зверху) — як завжди, добуток чисел a і b.

Покажемо тепер на числовому прикладі, як застосовується таке множення.

Нехай треба помножити 76 на 28. Робимо так:

(Схема наведена лише для пояснення; на практиці всі обчислення виконуються «в думці»).



Як простіше помножити?

Помножимо 6 одиниць на 8 одиниць, дістанемо 48 одиниць. Потім множимо «хрестиком» (щоб дістати $ad + bc$ десятків): 7 дес. на 8 од. і 2 дес. на 6 од., дістаємо 56 дес. $+$ 12 дес. $=$ $=$ 68 дес. і, додавши ще 4 дес. (що є в 48 од.), дістанемо 72 дес. Знаходимо тепер ac, множачи 7 дес. на 2 дес.; дістанемо 14 сотень. Але в 72 десятках 7 сотень; значить, всього сотень у нас 21. Отже, добуток містить 21 сотню, 2 десятки і 8 одиниць, тобто дорівнює 2128.

Ми дістали тут добуток 2128 з допомогою загального способу, придатного для множення двох будь-яких двоцифрових чисел. Цікаво мимохідь зазначити, що в цьому множенні двох ніби випадкових чисел винахідливий обчислювач виявить, як це часто буває, ту числову своєрідність, яка дасть змогу виконати множення «в думці» ще простіше.

Справді, помітивши, що $76 = 75 + 1$, будемо множити так:

$$28 \cdot 76 = 28 \cdot (75 + 1) = 28 \cdot 75 + 28 = 28(50 + 25) + 28 = 28 \cdot 50 + 28 \cdot 25 + 28 = \frac{2800}{2} + \frac{1400}{2} + 28 = 1400 + 700 + 28 = 2128.$$

МНОЖЕННЯ ДВОХ ДВОЦИФРОВИХ ЧИСЕЛ, БЛИЗЬКИХ ДО 100

Всяке двоцифрове число можна уявити у вигляді $100 - a$. Будемо називати a недостачею даного числа до 100. Якщо дані числа близькі до 100, то недостачі їх — порівняно невеликі числа, зручні для усних обчислень. Розглянемо таке множення у загальному вигляді:

$$(100 - a)(100 - b) = 100 \cdot 100 - 100a - 100b + ab = (100 - a - b)100 + ab.$$

Отже, щоб дістати число сотень шуканого добутку, досить від одного співмножника (наприклад $100-a$) відняти недостачу другого співмножника (тобто b) і до знайденої різниці приписати добуток недостач ab, якщо ab — число двоцифрове. Якщо ab — одноцифрове число, наприклад 8, то приписується 08.

Приклад. Помножити 87 на 94. Перша недостача 13, друга 6. Від 87 віднімаємо 6 (або від 94 віднімаємо 13), дістаємо 81. До 81 приписуємо $13 \cdot 6 = 78$. Добуток дорівнює 8178.

Ідею цього цікавого способу легко поширити і на множення двох трицифрових чисел, близьких до 1000. Помножимо, наприклад, 985 на 992. Перша недостача 15, друга 8. Віднімаючи 8 від 985 (або 15 від 992), дістанемо 977 — число тисяч шуканого добутку. Приписавши до 977 добуток недостач $15 \cdot 8 = 120$, дістанемо добуток 977 120.

ПРОЦЕНТНІ ОБЧИСЛЕННЯ

Найпростіші прийоми процентних обчислень, що розглядаються і в школі, неважко використати і в деяких складніших випадках процентних обчислень. Насамперед звернемо увагу на те, що $p\%$ від числа a становить $\frac{ap}{100}$ і $a\%$ від числа p становить $\frac{pa}{100}$; але $\frac{ap}{100} = \frac{pa}{100}$. Тому, якщо це зручно, ми завжди можемо замінити обчислення $p\%$ від a обчисленням $a\%$ від p.

Нехай треба знайти 72% від 85. Легше знайти 85% від 72. Але 85% від 72 становлять 72 без 15% від 72, а 15% від 72 є сума $7{,}2 + 3{,}6 = 10{,}8$. Шукане число знайдено: $72 - 10{,}8 = 61{,}2$.

Як легше виконати дії з процентами?

Другий приклад: знайти 72,8% від $37\frac{1}{2}$. І тут шукатимемо $37\frac{1}{2}\%$ від 72,8. «Ключ» до усного розв'язання полягає у відомому факті: $12\frac{1}{2}\%$ від числа — все одно, що $\frac{1}{8}$ частина цього числа. А через те що $37\frac{1}{2}\% = 12\frac{1}{2}\%$ 3, то весь розрахунковий процес зведеться до знаходження $\frac{3}{8}$ від 72,8. Ділячи 72,8 на 8, дістанемо 9,1, а шукане число $9{,}1 \cdot 3 = 27{,}3$.

ОКРЕМІ ВИПАДКИ ПІДНЕСЕННЯ ЧИСЕЛ ДО КВАДРАТА

Корисно звернути увагу на два випадки піднесення чисел до квадрата: цілих чисел, що закінчуються цифрою 5, і мішаних чисел, дробова частина яких дорівнює $\frac{1}{2}$. У кожному з цих випадків спочатку сформулюємо загальне правило і доведемо його справедливість.

Правило I. Щоб піднести до квадрата ціле число, яке закінчується цифрою 5, досить число десятків цього числа помножити на наступне натуральне число і до добутку приписати 25.

Доведення. Всяке число, яке закінчується цифрою 5, можна подати у вигляді $10a + 5$, де a — число десятків цього числа. Тоді

$$(10a + 5)^2 = 100a^2 + 100a + 25 = 100a(a + 1) + 25 = a(a + 1) \cdot 100 + 25.$$

Останній вираз повністю відповідає тексту правила.

Приклад. Піднести до квадрата 145. Множимо число десятків 14 на 15, дістаємо 210 і приписуємо 25; $145^2 = 21025$.

Правило II. Щоб піднести до квадрата мішане число, дробова частина якого дорівнює $\frac{1}{2}$, досить цілу частину мішаного числа помножити на наступне натуральне число і до добутку приписати $\frac{1}{4}$.

Доводимо його так само, як і правило I.

Приклад. Піднести до квадрата $19\frac{1}{2}$. Множимо 19 на 20, дістаємо 380 і до 380 приписуємо $\frac{1}{4}$; $\left(19\frac{1}{2}\right)^2 = 380\frac{1}{4}$.

Як швидко піднести до квадрата таке число?

ВИСНОВОК

Ми розглянули тут лише окремі, найважливіші прийоми усної ліч-

би. Навряд чи є рація пробувати запам'ятати велике число спеціальних правил, бо без частого застосування вони неминуче забуватимуться. Та й хоч які корисні такі правила, все ж таки для оволодіння усною лічбою набагато важливіше розвинути в собі допитливість і кмітливість, без яких не обійтися, коли ніякі вивчені правила не допомагають. Відомий, наприклад, такий випадок: учням V класу сільської школи було запропоновано помножити «в думці» 84 на 84. Один хлопчик майже відразу дав відповідь: 7056. На запитання, як він підрахував, хлопчик відповів: «Та я просто відняв 144 від 7200». Якщо ми тепер простежимо хід усних обчислень хлопчика, то побачимо, що він лічив так:

$$84 \cdot 84 = (12 \cdot 7) \cdot (12 \cdot 7) = (12 \cdot 12) \cdot (7 \cdot 7) =$$
$$= 144 \cdot (50 - 1) = 144 \cdot \frac{100}{2} - 144 = 7200 - 144.$$

Іноді навіть дуже загадкова задача, яку не допоможуть розв'язати жодні правила, легко розв'язується звичайним «міркуванням». Наприклад, треба розшифрувати числовий ребус

$$a \cdot c \cdot \overline{ac} = \overline{ccc},$$

де a і c — цифри. З цієї рівності випливає: $a \cdot \overline{ac} = \overline{ccc} : c$. Але при будь-якому одноцифровому c частка $\overline{ccc} : c = 111$, тобто $a\ \overline{ac} = 111$. Але 111, як добуток одноцифрового множника на двоцифровий, можна подати єдиним способом: $3 \cdot 37$. Ребус розшифровано:

$$a = 3,\ c = 7 \text{ і } 3 \cdot 7 \cdot 37 = 777.$$

На закінчення зауважимо, що кмітливість, яку часто називають «математичною кмітливістю», — не тільки основа успішної усної лічби. Вона може зробити людині неоціненну послугу в будь-якій галузі її діяльності.

ЛІЧИЛЬНІ ПРИСТРОЇ

(рахівниця, логарифмічна лінійка, арифмометр)

Якщо ви зайдете до бухгалтерії якої-небудь установи або в обчислювальну лабораторію чи подивитесь, як працюють інженери, що роблять численні розрахунки, словом, якщо ви придивитесь до роботи людей, що мають справу з обчисленнями, то побачите, що вони широко користуються різними допоміжними засобами для полегшення обчислювальної праці. Рахівники використовують рахівниці та арифмометри; інженери вдаються по допомогу до різних таблиць і графіків та часто користуються лічильними лінійками з численними шкалами, від яких з незвички може зарябіти в очах; лаборанти-обчислювачі, вмикаючи мотори лічильних машин, виконують з великою швидкістю різні операції над многоцифровими числами.

У великих обчислювальних лабораторіях ви зможете побачити машини, які розв'язують з дивовижною швидкістю найскладніші математичні задачі, досить лише дати їм програму, за якою вони повинні виконувати обчислення.

Вже в далекі часи люди прагнули полегшити обчислювальну роботу, звести складні операції до простіших. Наприклад, у стародавньому Вавілоні ділення намагалися замінити множенням діленого на число, обернене до дільника; про це свідчать клинописні таблички, що дійшли до нас, на яких дано значення дробу $\frac{1}{n}$ при різних значеннях n.

У XVI ст. в Європі поширився так званий простафереточний спосіб множення чисел (від грецьких слів «простезис» — додавання і «афайрезис» — віднімання), що грунтується на тотожності

$$a \cdot b = \frac{(a+b)^2}{4} - \frac{(a-b)^2}{4}.$$

Якщо скласти таблицю значень функції $\frac{x^2}{4}$ для цілих значень x, то для обчислення добутку ab (a, b — цілі числа) досить буде визначити спочатку $a + b$ і $a - b$, потім знайти з таблиць числа $\frac{(a+b)^2}{4}$ і $\frac{(a-b)^2}{4}$ і від першого з них відняти друге. В таблиці немає потреби поміщати (при непарних значеннях x)

дробові частини чисел $\frac{x^2}{4}$, бо при остаточному відніманні вони все одно знищуються.

Справа наведено для прикладу кілька рядків такої таблиці.

Якщо $a = 253$, а $b = 224$, то $ab = 56\,882 - 210 = 56\,672$ (через те що $a+b=477$ і $a-b=29$); аналогічно

Дес. Од.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	1	2	4	6	9	12	16	20
1	25	30	36	42	49	56	64	72	81	90
2	100	110	121	132	144	156	169	182	196	210
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
47	55225	55460	55696	55932	56169	56406	56644	56882	57121	57360
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
199	990025	991020	992016	993012	994009	995006	996004	997002	998001	999000

$$1233 \cdot 761 = 994\,009 - 55\,696 = 938\,313.$$

Звичайно, зручніше користуватися таблицями, що дають відразу добутки даних чисел; наприклад, у таблицях О'Рурка в кожній з табличок із заголовками від 10 до 999 вміщені добутки числа, що стоїть у заголовку, на всі числа від 1 до 99; однак, щоб мати можливість знайти відразу в таблиці добуток двох трицифрових чисел, треба було б обсяг і без того товстих таблиць збільшити в 10 раз. В той же час простаферетичні таблиці, які дають ті самі можливості, містили б лише 200 рядків.

Простаферетичні таблиці поступилися місцем на початку XVII ст. таблицям логарифмів, що полегшили не тільки множення, а й ділення чисел та добування коренів.

У далеке минуле сягає також винайдення найпростіших лічильних приладів. Так, у Стародавній Греції і в Римі для полегшення обчислень застосовувалась лічильна дошка — а б а к (рис. 1). Залежно від того, на яку смугу клали камінці, вони заміняли те чи інше число. Абак застосовувався довгий час і в Західній Європі.

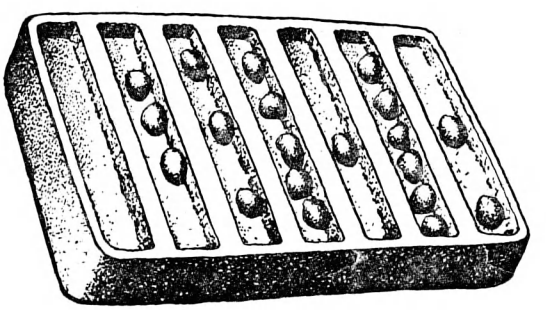


Рис. 1. Абак.

У Китаї вже в далекій давнині з'явився лічильний прилад с у а н-п а н, що набрав у пізніший час вигляду рами з дротинами, поділеної проміжною планкою на дві частини (рис. 2). Кожна з двох кісточок, що містяться праворуч від планки, заміняє п'ять одиниць, а кожна з п'яти кісточок ліворуч від планки — одну одиницю. Присуваючи до планки кісточки, можна зобразити на суан-пані будь-яке ціле число.

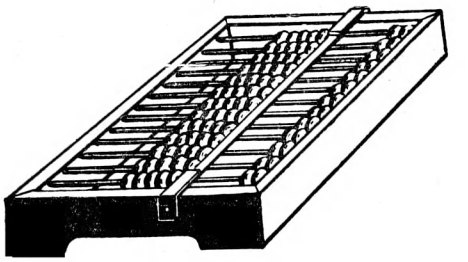


Рис. 2. Суан-пан.

Японський с о р у б а н відрізняється від суан-пана тільки тим, що праворуч від планки замість двох кісточок міститься одна кісточка.

В Росії з давніх часів застосовувався значно зручніший прилад — р о с і й с ь к а р а х і в н и ц я (рис. 3).

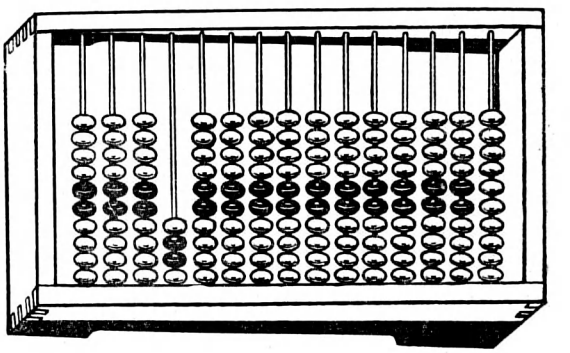


Рис. 3. Російська рахівниця.

РАХІВНИЦЯ І ПАЛИЧКИ НЕПЕРА

У далекому минулому рахівниця мала дещо іншу конструкцію — кісточки нанизували на тонкі вірьовки. Потім вірьовки замінили дротинами, і вже на початку XVIII ст. рахівниця набула в основному сучасного вигляду. Правда, до введення у нас метричної системи на двох дротинах поміщали по 4 кісточки — тоді дуже поширені були четверті частки різних одиниць.

У метричній системі одиниці вимірювання діляться на 10, 100 і т. д. частин, і тепер немає потреби в дротинах з чотирма кісточками.

Для дій з десятковими дробами корисно мати «рухомі коми» — зігнуті дротинки, що надіваються на лівий край рами.

Можливо, що багатьом з вас рахівниця могла здатися мало цікавим приладом. Але придивіться, з якою майстерністю працюють на рахівницях касири, рахівники — одне слово, усі, кому доводиться виконувати за день силу-силенну операцій додавання і віднімання многоцифрових чисел!

Для виконання цих операцій рахівниця особливо зручна — в цьому ви самі можете легко переконатись. Наприклад, для додавання чисел 4683 і 2719 треба, відклавши на нижніх дротинах число 4683, додати до нього (рис. 4) послідовно числа: 2000 (2 кісточки в розряді тисяч), 700 (через те що в розряді сотень справа є всього 4 кісточки, то треба додати 1 кісточку в розряді тисяч і відняти 3 кісточки в розряді сотень), 10 (1 кісточку в розряді десятків) і, нарешті, 9 (додавши 1 кісточку в розряді десятків і віднявши 1 кісточку в розряді одиниць); після цього 10 кісточок в розряді десятків треба замінити однією кісточкою в розряді сотень.

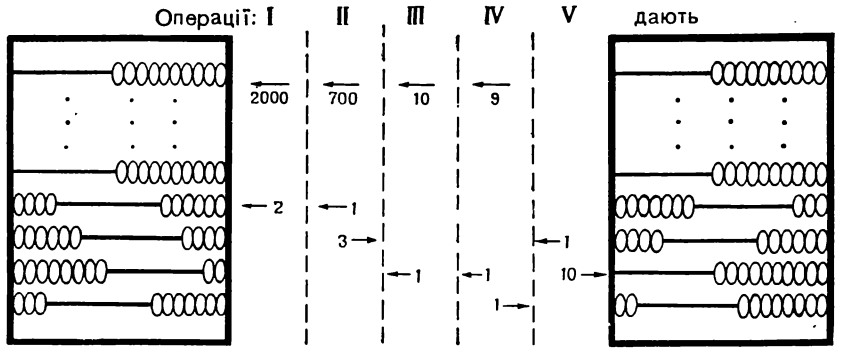


Рис. 4. Додавання на рахівниці.

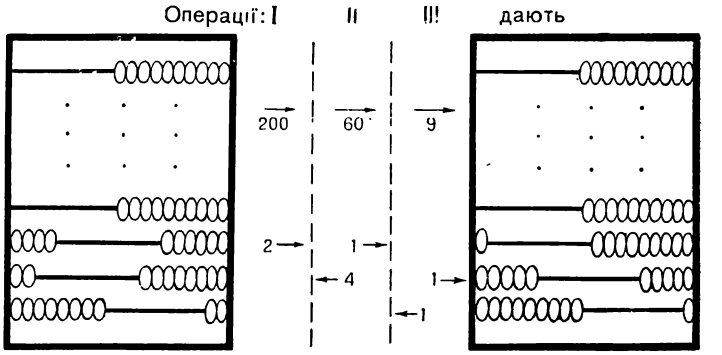


Рис. 5. Віднімання на рахівниці.

Аналогічно виконується віднімання. Наприклад, для обчислення різниці 428—269 ми повинні, відклавши число 428, послідовно відняти від нього 200 (2 кісточки в розряді сотень), потім 60 (віднімаючи 1 кісточку в розряді сотень і додаючи 4 кісточки в розряді десятків) і, нарешті, 9 (віднімаючи 1 кісточку в розряді десятків і додаючи 1 кісточку в розряді одиниць) (рис. 5).

Для множення і ділення на рахівниці дуже корисні п а л и ч к и Н е п е р а — простий пристрій, що полегшує множення і ділення многоцифрових чисел (опис їх дав у 1617 р. винахідник логарифмів шотландський математик Непер).

Для виготовлення цього простого лічильного приладу треба на вузьких смужках картону, цупкого паперу або, найкраще, гладенької фанери виписати в квадратних клітках добутки одноцифрового числа, що стоїть у заголовку палички, на числа 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, записуючи в кожній клітці число десятків добутку вище, а число одиниць — нижче діагоналі (див. рис. 6, де зліва зображена ще допоміжна паличка, яка полегшує визначення номерів кліток).

Палички Непера дають змогу відразу знаходити добутки многоцифрових чисел на будь-яке одноцифрове число. Наприклад, бажаючи знайти добуток 594·7, ми повинні покласти поруч з допоміжною паличкою па-

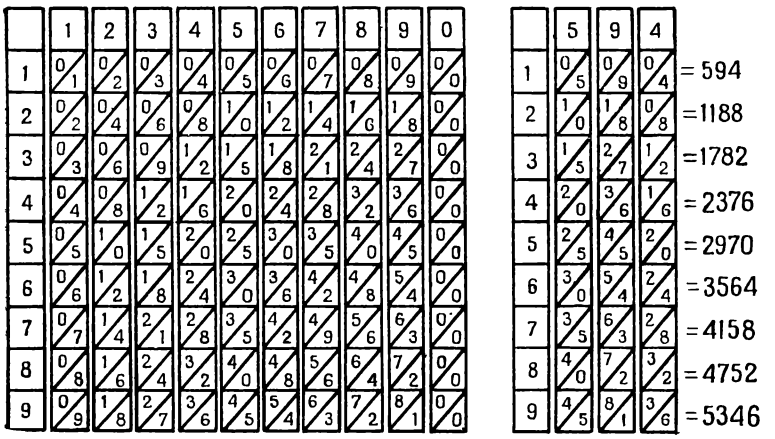
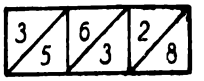


Рис. 6. Палички Непера.

лички із заголовками 5, 9, 4 (рис. 6); тоді у сьомому рядку матимемо:



звідки робимо висновок, що $594 \cdot 7 = 4158$. Справді, в кожній клітці вище від похилої лінії стоїть цифра, яка при звичайному множенні «в думці» відразу додається до одиниць вищого розряду; отже, в шуканому числі буде 8 одиниць, 5 десятків (2 + 3), 11 сотень (6 + 5) — одну сотню пишемо, а одну тисячу залишаємо «в думці», що дає разом з трьома тисячами, які стоять у лівій клітці над похилою рисою, 4 тисячі.

Через те що у множеному може зустрітися кілька однакових цифр, то корисно мати по кілька паличок з кожним заголовком.

При перемноженні многоцифрових чисел палички Непера дозволяють відразу виписувати добутки множеного на окремі числа множника, а при діленні — визначати чергову цифру частки і добуток цієї цифри на дільника. Наприклад:

$$\begin{array}{r} 594 \\ \times\ 467 \\ \hline \rightarrow 4158 \\ \rightarrow 3564 \\ \rightarrow 2376 \\ \hline 277398 \end{array} \qquad \begin{array}{r|l} 29467 & 594 \\ \rightarrow 2376 & \overline{49{,}6} \\ \hline \rightarrow 5707 & \\ \rightarrow 5346 & \\ \hline 3610 & \\ \rightarrow 3564 & \\ \hline 46 & \end{array}$$

(відмічені стрілками числа знаходимо відразу з допомогою паличок Непера — див. рис. 6).

Якщо множення (594 × 467) виконується на рахівниці, то воно зводиться до додавання 2376 сотень (594 × 4), 3564 десятків (594 × 6) і 4158 одиниць (594 × 7) (рис. 7).

При діленні ж на рахівниці (29 467 : 594) треба ділене відкласти на нижніх дротинах (або трохи вище) і знайти найближче менше до числа 2946 кратне числа 594 (це буде $2376 = 594 \times 4$). Віднімаючи це число від 2946, треба одночасно відкласти (рис. 8) на верхній дротині першу цифру частки (4). Потім треба знайти найближче менше до 5707 кратне числа 594 (це буде $5346 = 594 \times 9$); відклавши на другій зверху дротині другу цифру частки (9), треба 5346 відняти від 5707 і т. д.

На рис. 8 ділене взято з двома десятковими знаками (нижче рухомої коми — розряди десятих і сотих частин), а в частці (вгорі) рухома кома відділяє цілу частину частки від дробової.

На рахівниці можна також добувати корені квадратні з чисел. Через те що сума послідовних непарних чисел (починаючи з одиниці) дорівнює $1 + 3 + 5 + \ldots + (2n-3) + (2n-1) = n^2$, то обчислення $\sqrt{N}$ можна звести до перевірки того, сума скількох доданків виду 1, 3, 5,... не перевищуватиме числа N. При великих N така перевірка втомлива, тому краще послідовно визначати окремі цифри шуканого кореня. Для цього розбивають число на грані і від старшої грані віднімають 1, 3, 5,... доти, поки це можливо. Таким способом дістають цифру старшого розряду шуканого числа (a). До остачі

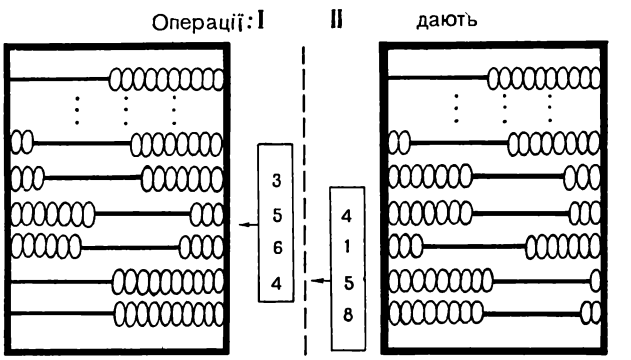


Рис. 7. Множення на рахівниці.

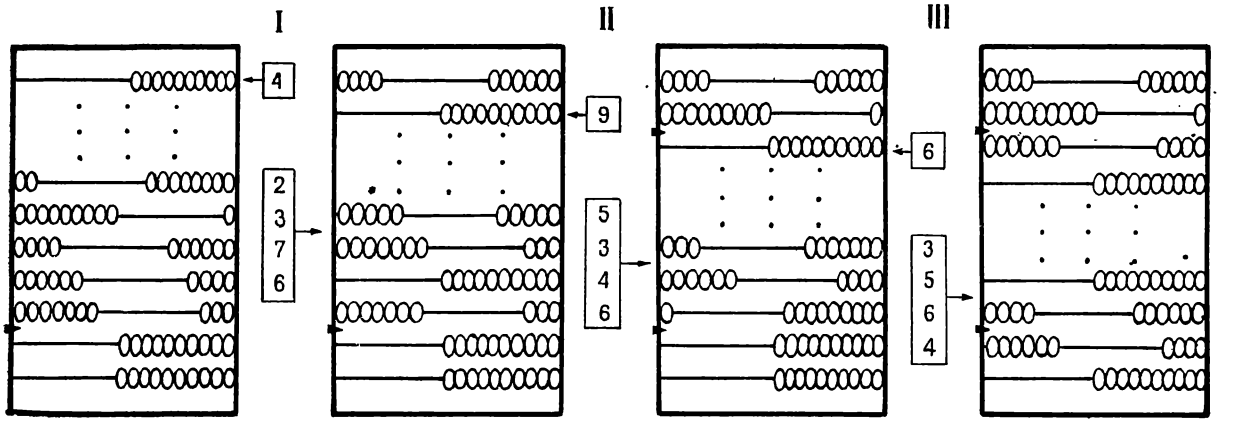


Рис. 8. Ділення на рахівниці.

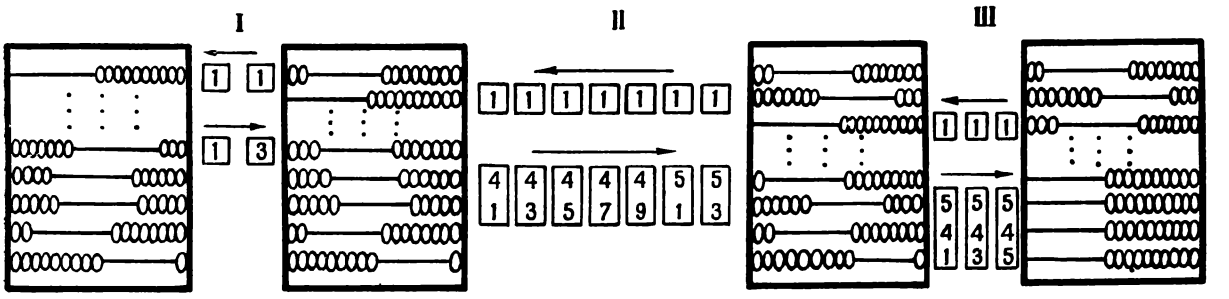


Рис. 9. Добування квадратного кореня на рахівниці.

приєднують наступну грань і від знайденого числа послідовно віднімають $20a + 1$, $20a + 3$, $20a + 5$ і т. д. На рис. 9 показано добування цим способом квадратного кореня з 74 529.

ЛОГАРИФМІЧНА ЛІНІЙКА

Хоч рахівниці і палички Непера дуже полегшують виконання арифметичних операцій, при складніших розрахунках, зв'язаних, наприклад, з обчисленням коренів вищих степенів, з обчисленням значень тригонометричних функцій тощо, рахівниці і палички Непера допомогти вже не можуть.

У цих випадках особливо корисні таблиці логарифмів. Часто достатня точність обчислень забезпечується чотирицифровими таблицями, але іноді доводиться користуватися п'ятицифровими і навіть семицифровими таблицями логарифмів.

У тих же випадках, коли досить виконати розрахунки з 2—3 вірними цифрами, можна обійтися навіть трицифровими таблицями. Тут замість таблиць з успіхом може бути використана логарифмічна, або лічильна, лінійка — простий лічильний прилад, надзвичайно зручний завдяки своїм невеликим розмірам і простоті виконання на ньому різноманітних операцій.

Вона складається з корпусу, повзуна (вузька планка, що переміщується уздовж корпусу в спеціальних пазах) і бігунка з візирною лінією (металева рамка з склом, на якому нанесена тонка лінія).

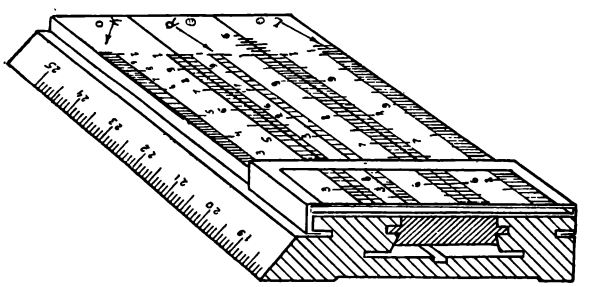
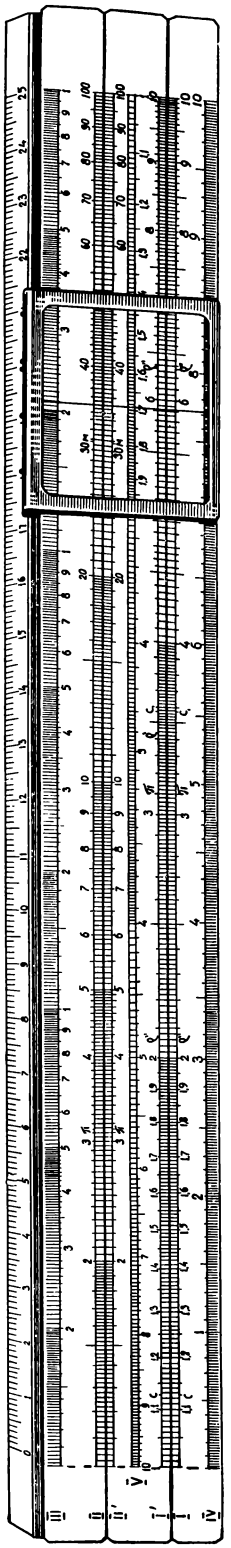


Рис. 10. Поперечний розріз логарифмічної лінійки.



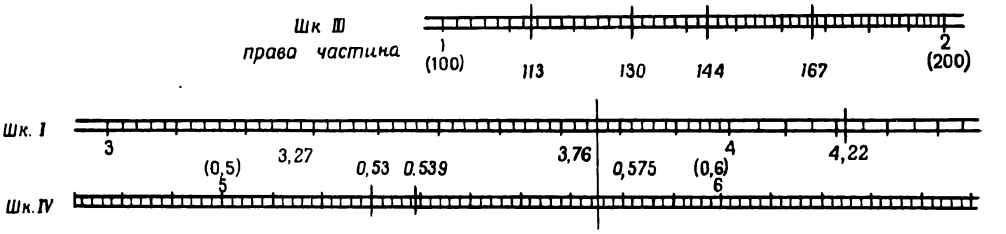


Рис. 12. Як слід читати числові позначки на шкалі.

На рис. 10 зображено поперечний розріз логарифмічної лінійки, а на рис. 11 — вигляд лінійки зверху.

Головну роль на лінійці відіграють логарифмічні шкали, що дають змогу множення і ділення чисел заміняти додаванням і відніманням деяких відрізків.

Для побудови логарифмічної шкали вибирають одиницю масштабу E (модуль шкали) і від початку шкали відкладають — при різних значеннях x — відрізки, що дорівнюють $E \lg x$; на кінці кожного з цих відрізків ставлять (або мають на увазі) числову позначку — відповідне значення x. Так побудовані при $E = 25$ *см* шкала I (на корпусі) і шкала I′, що примикає до неї (на повзуні) (рис. 11). У логарифмічних шкал II (на корпусі) і II′ (на повзуні) модуль $E_1 = \frac{E}{2} = 12{,}5$ *см*, а у шкали III (верхня частина корпусу) модуль $E_2 = \frac{E}{3} = 8\frac{1}{3}$ *см*.

Числові позначки в середній і в правій частинах шкали III слід у думці збільшити відповідно в 10 і в 100 раз, а на рівномірній шкалі IV — зменшити в 10 раз (вони дадуть при цьому відстань відповідних точок від початку шкали — при одиниці масштабу $E = 25$ *см*).

Не всі точки на шкалах мають числові позначки. Для визначення числової позначки будь-якої точки якої-небудь шкали треба визначити число «поділок» (інтервалів), які містяться між найближчими точками шкали з числовими позначками, і «ціну» кожної поділки. Наприклад, інтервал 3—4 на шкалі I має 10 великих поділок, кожна з яких містить 5 маленьких поділок. Через те що на кінцях інтервалу стоять числові позначки 3 і 4, то «ціна» кожної великої поділки в інтервалі 3—4 буде 0,1, а малої — 0,02. В інтервалі 4—5 шкали I «ціна» великої поділки дорівнює 0,1, а малої — 0,05; в інтервалі 1—2 (100—200) у правій частині шкали III «ціна» великої поділки — 10, а малої — 2; на рівномірній шкалі IV «ціна» кожної великої поділки — 0,01, а малої — 0,002.

Щоб добре лічити на логарифмічній лінійці, треба навчитися швидко і правильно визначати числові позначки точок на різних ділянках будь-якої шкали. На рис. 12 окремі ділянки шкали подані у збільшеному масштабі і вказані числові позначки деяких точок. При цьому, якщо точки не позначені на шкалах штрихами, то їх числові позначки визначаються приблизно, «на око».

Шкала IV дає змогу (з допомогою візирної лінії) вимірювати з точністю до однієї тисячної відстані від початку шкали I до будь-якої її точки a, тобто знаходити трицифровий логарифм числа a. Далі ми говоритимемо «точка a», замість «точка з числовою позначкою a». З рис. 12 видно, що відстань від початку шкали I до точки 3,76 дорівнює приблизно $0{,}575E$; отже, $\lg 3{,}76 \approx 0{,}575$; аналогічно

$$\lg 478 = \lg 100 + \lg 4{,}78 \approx 2{,}675.$$

Рис. 11. Вигляд логарифмічної лінійки зверху.

МНОЖЕННЯ І ДІЛЕННЯ

При множенні і діленні чисел завжди можна, переносячи в даних числах коми, виконувати на лінійці операції над числами, що містяться між 1 і 10; місце коми в знайденому числі легко визначити, прикинувши в думці — після грубого округлення даних чисел — приблизні розміри очікуваного результату.

Через те що $\lg(ab) = \lg a + \lg b$ і $\lg\frac{a}{b} = \lg a - \lg b$, то множення і ділення чисел зводиться до додавання і віднімання логарифмів цих чисел, а останнє здійснюється зовсім просто з допомогою повзуна[1].

Умовимося називати початок і кінець шкали I′ відповідно початком і кінцем повзуна.

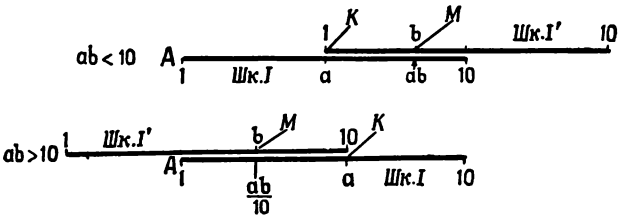


Рис. 13. Схема множення на логарифмічній лінійці.

Якщо a і b містяться між 1 і 10, то множення a на b виконують так:

якщо $ab < 10$, то початок повзуна суміщають з точкою a шкали I і шуканий добуток ab знаходять на шкалі I біля точки b шкали I′;

якщо $ab > 10$, то з точкою a шкали I суміщають кінець повзуна; тоді біля точки b, взятої на шкалі I′, на шкалі I буде точка $\frac{ab}{10}$. Справді, з рис. 13 видно, що в першому випадку $AM = AK + KM = E\lg a + E\lg b = E\lg(ab)$, а в другому випадку $AM = AK - MK = E\lg a - (E - E\lg b) = E\lg\frac{ab}{10}$.

При діленні a на b треба сумістити точку a шкали I з точкою b шкали I′; тоді при $a > b$ частку $\frac{a}{b}$ знайдемо на шкалі I біля початку повзуна, а при $a < b$ на шкалі I біля

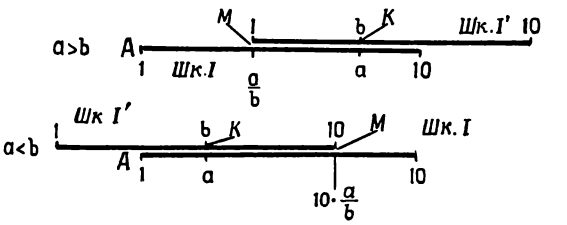


Рис. 14. Схема ділення на логарифмічній лінійці.

кінця повзуна знайдемо $\frac{10a}{b}$. Справді, з рис. 14 видно, що при $a > b$ $AM = AK - MK = E\lg a - E\lg b = E\lg\frac{a}{b}$, а при $a < b$ $AM = AK + KM = E\lg a + (E - E\lg b) = E\lg\frac{10a}{b}$.

ПІДНЕСЕННЯ ДО СТЕПЕНЯ І ДОБУВАННЯ КОРЕНЯ

Ці операції виконують на лінійці за тією ж схемою, що й при користуванні таблицями логарифмів. Якщо, наприклад, $x = \sqrt[7]{0{,}24^4}$, то, логарифмуючи, дістанемо $\lg x = \frac{4}{7}\lg 0{,}24 \approx \frac{4}{7}\cdot\bar{1}{,}380$ (з допомогою шкал I і IV), або, після підрахунку, $\lg x \approx \bar{1}{,}646$. Для мантиси 0,646, взятої на шкалі IV, на шкалі I знайдемо число 4,43; враховуючи, що характеристика дорівнює —1, матимемо: $x \approx 0{,}443$. Але піднесення чисел до квадрата і до куба, а також добування коренів квадратних і кубічних здійснюється значно простіше з допомогою шкал I, II і III. Якщо при якомусь положенні бігунка візирна лінія проходить через точки a, b, c шкал I, II, III (рис. 15), то відрізувані нею відрізки дорівнюватимуть один одному, тобто матимемо $E\lg a = \frac{E}{2}\lg b = \frac{E}{3}\lg c$, звідки $a = \sqrt{b} = \sqrt[3]{c}$, або $b = a^2$ і $c = a^3$.

Отже, для піднесення числа a, що міститься між 1 і 10, до квадрата (до куба), треба взяти точку a на шкалі I і знайти з

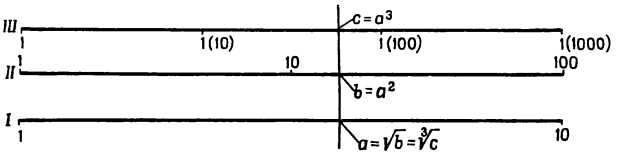


Рис. 15. Схема обчислення a^2, a^3, $\sqrt{b}$, $\sqrt[3]{c}$.

[1] Читачам, не обізнаним з теорією логарифмів, корисно перевірити ці формули при різних окремих значеннях a і b, визначаючи $\lg a$ і $\lg b$ з допомогою шкал I і IV.

допомогою візирної лінії точку $b = a^2$ на шкалі II (точку $c = a^3$ на шкалі III).

При $a < 1$ і при $a > 10$ треба спочатку подати a у вигляді $a = 10^k \cdot a'$, де a' міститься між 1 і 10.

При обчисленні $\sqrt{b}$ або $\sqrt[3]{c}$ треба спочатку подати b у вигляді $b = 10^{2p} \cdot b'$, а c — у вигляді $c = 10^{3q} \cdot c'$, де b' міститься між 1 і 100, а c' — між 1 і 1000, і шукати з допомогою візирної лінії на шкалі I $\sqrt{b'}$ або $\sqrt[3]{c'}$. Наприклад, $\sqrt[3]{0{,}0002} = \sqrt[3]{10^{-6} \cdot 200} \approx 10^{-2} \times$ $\times\, 5{,}86 = 0{,}0586$.

Ми не будемо спинятися на розгляді тригонометричних шкал (на зворотній стороні повзуна), що дають змогу знаходити наближені значення тригонометричних функцій і виконувати над ними різні дії, та «зворотної» шкали на повзуні, зручної при перемноженні кількох чисел.

Є дуже багато прийомів, що дозволяють швидко виконувати операції, які включають ряд множень і ділень, розв'язувати на логарифмічній лінійці квадратні рівняння тощо; з ними читач зможе ознайомитися за спеціальним посібником (наприклад, за книгою Д. Ю. Панова «Счетная линейка»).

Нам хотілося лише показати, як на лінійці дотепно використано основні властивості логарифмів.

Застосовувати логарифмічну шкалу почали вже на початку XVII ст., через кілька років після появи перших таблиць логарифмів. Правда, відрізки, що заміняють логарифми чисел, додавали і віднімали тоді з допомогою циркуля. Лише в середині XVII ст. з цією метою почали користуватися повзуном. Бігунок було введено в середині XIX ст., після чого логарифмічна лінійка набула в основному сучасного вигляду.

Для збільшення точності обчислень можна збільшити модуль основної логарифмічної шкали. Щоб не збільшувати при цьому розміри приладу, логарифмічну шкалу іноді «розрізають» і наносять по частинах уздовж твірних циліндра, а повзун заміняють прозорим порожнистим циліндром, який може легко пересуватися по основному циліндру.

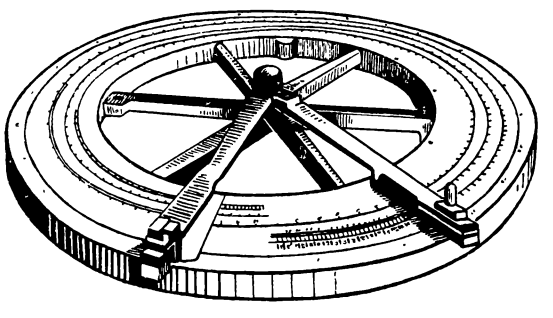


Рис. 16. Кругла «лінійка»-гігант.

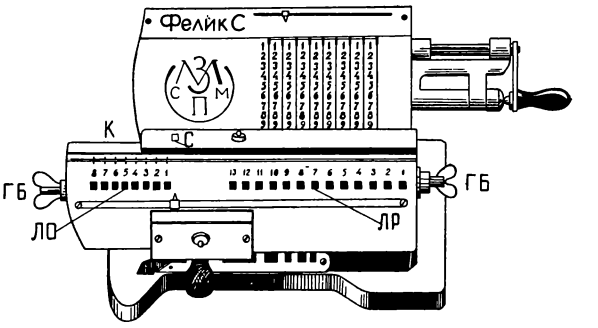


Рис. 17. Арифмометр «Фелікс» (зовнішній вигляд).

Іноді логарифмічні шкали наносять на краї диска і кільця, всередині якого диск може обертатися; такі круглі логарифмічні «лінійки» мають вигляд кишенькового годинника. Є також «лінійки»-гіганти з діаметром в 1 *м* і модулем логарифмічної шкали в 3 *м* (рис. 16). Точність обчислень на таких «лінійках», звичайно, значно вища, але для обслуговування їх потрібно двоє людей.

ЛІЧИЛЬНІ МАШИНИ

Винайдення перших лічильних машин пов'язано з іменами Паскаля та Лейбніца (XVII ст.). З 1820 р. у Парижі почали виробляти фабричним способом лічильні машини Лейбніца з «ступінчастими валиками»; однак за 60 років було виготовлено лише близько півтори тисячі машин.

Особливо сприяло поширенню лічильних машин винайдене в 1874 р. петербурзьким інженером Однером колесо з висувними зубцями. Наприкінці XIX ст. почали з'являтися різні різновидності арифмометра Однера. Однією з них є дуже поширений у нас арифмометр «Фелікс». Він складається (рис. 17) з корпусу і каретки (К), яку, натискуючи на спеціальний важіль, можна пересувати вправо і вліво вздовж корпусу арифмометра. У кришці каретки є дві групи віконець: справа — 13 віконець лічильника результатів (ЛР) — в них при роботі на арифмометрі з'являються результати додавання, від-

німання і множення даних чисел, а зліва — 8 віконець лічильника обертів (ЛО) — в них при множенні з'являється множник, а при діленні — частка.

З допомогою гасильних баранців (ГБ) можна добитися того, щоб у всіх віконцях лічильника результатів або лічильника обертів з'явилися нулі. Віконця обох лічильників пронумеровані. Будемо говорити, що каретка перебуває в положенні n, якщо стрілка C на кришці корпусу вказує на віконце лічильника обертів з номером n (писатимемо «К в пол. n»).

Щоб скласти ясне уявлення про роботу арифмометра, знімемо кришки з корпусу і каретки. Всередині корпусу (рис. 18) ми побачимо барабан Однера (БО), що приводиться в обертання рукояткою і складається з дев'яти основних коліс Однера (КО) (пронумеруємо їх справа наліво цифрами 1, 2, 3,..., 8, 9)[1] і чотирьох додаткових (у лівій частині барабана).

Обертання рукоятки і обертання барабана Однера умовимося називати прямими, коли рукоятка рухається за схемою «до нас, вгору, від нас, вниз».

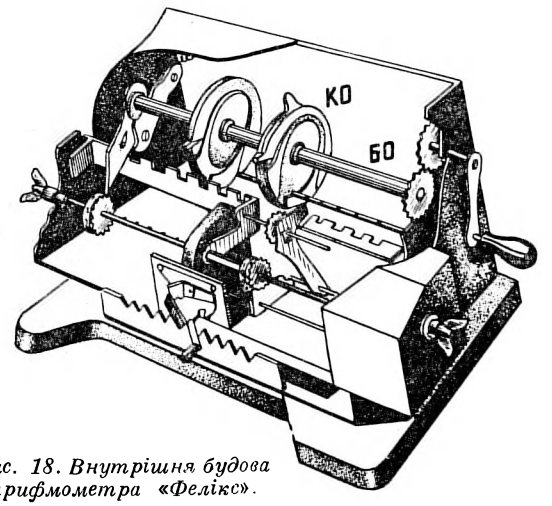


Рис. 18. Внутрішня будова арифмометра «Фелікс».

При кожному оберті барабана спеціальний «штовхач» (рис. 18), зв'язаний з віссю барабана, повертає цифрове колесо лічильника обертів, що стоїть проти стрілки C (рис. 17), на $\frac{1}{10}$ повного оберту, і при прямому обертанні рукоятки у віконці з'являються послідовно білі цифри 1, 2, 3, ..., 8, 9, а при зворотному —

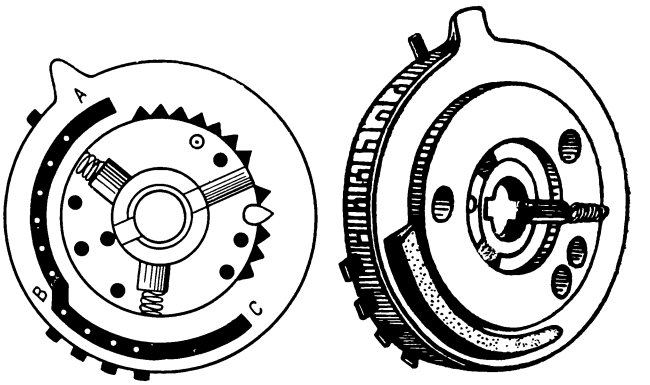


Рис. 19. Колесо Однера.

червоні цифри 1, 2, 3,..., 7, 8 і, нарешті, біла цифра 9.

У лічильнику результатів на ободі кожного цифрового колеса стоїть 10 цифр від 0 до 9. До кожного колеса справа прикріплена шестірня з десятьма зубцями, а зліва — один великий зубець.

У кожному основному колесі Однера є товстий диск (рис. 18), на циліндричний виступ якого надіто установочний диск (він на рис. 19 зображений окремо) з установочним важільцем. В установочному диску є фігурний виріз ABC, в який входять штифтики дев'яти висувних зубців, що пересуваються в радіальних пазах товстого диска. Кожний зубець або «потоплений» в товстому диску, або трохи висунутий з нього назовні. Це залежить від того, чи входить штифт зубця в дугу AB, чи в дугу BC фігурного вирізу установочного диска. Пересуваючи установочний важілець у прорізу кришки корпусу до певної цифри, ми висуваємо назовні відповідне число зубців.

Крім висувних зубців, в кожному основному колесі Однера (крім першого) є ще два відхильних зубці, відведені спеціальними пружинками від площини, в якій є висувні зубці. Їх призначення — повертати цифрове колесо, що перебуває проти колеса Однера, на $\frac{1}{10}$ частину оберту, коли сусіднє справа колесо зробить повний оберт.

На додаткових колесах є тільки відхильні зубці.

Установимо на барабані число 2035, тобто висунемо з допомогою установочних важільців на першому колесі 5 зубців, на другому — 3 і на четвертому — 2 зубці. При прямому оберті рукоятки кожен висунутий зубець, діючи

[1] На рисунку для спрощення показано тільки два колеса Однера.

через проміжну шестірню, поверне цифрове колесо, яке міститься під ним, на $\frac{1}{10}$ оберту так, що в лічильнику результатів (якщо перед цим він був погашений) з'явиться число 2035.

Якщо встановити потім на барабані, наприклад, число 7 і зробити повільно прямий оберт рукоятки, то легко простежити, як у 1-му віконці лічильника результатів з'являтимуться (в міру того як спрацьовуватимуть висунуті зубці 1-го колеса Однера) цифри 6, 7, 8, 9, 0, 1, 2. Але в той момент, коли цифра 9 зміниться на 0, великий зубець з лівого боку цифрового колеса трохи відхилить спеціальний важілець («десяточник»), що міститься на осі, паралельній осі лічильника результатів. Десяточник відхилить злегка вліво відхильний зубець другого колеса Однера, і останній поверне друге цифрове колесо на $\frac{1}{10}$ оберту (це станеться трохи пізніше — після появи у першому віконці цифри 2). У підсумку лічильник результатів покаже число 2042 (2035 + 7).

Якщо потім зробити повільно зворотний оберт рукоятки, то можна простежити, як у першому віконці замість цифри 2 з'являться послідовно 1, 0, 9, 8, 7, 6, 5, причому в той момент, коли 0 змінюватиметься на 9, десяточник відхилиться і примусить спрацювати (трохи пізніше) другий відхильний зубець другого колеса, і в другому віконці цифра 4 зміниться на 3.

Аналогічно стоятиме справа в усіх інших віконцях при зміні 9 на 0 (при прямому обертанні барабана) або при зміні 0 на 9 (при його зворотному обертанні).

Розглянемо, як виконуються на арифмометрі основні операції. При обчисленні $a \pm b$ (a і b — цілі) треба погасити лічильник результатів і поставити каретку в положення 1. Встановивши на барабані Однера число a, треба прямим обертанням рукоятки перенести його в лічильник результатів. Встановивши потім на барабані число b, можна його прямим обертанням додати до a, а зворотним — відняти від a. Так само знаходимо і алгебраїчну суму кількох чисел.

Для множення a на b треба погасити обидва лічильники і встановити множене a на барабані. Якщо, наприклад, $b = 437$, то, переводячи каретку в положення 3, треба зробити 4 прямих оберти (в лічильнику результатів з'явиться $a \cdot 400$), потім у положенні 2 зробити 3 прямих оберти (в лічильнику результатів до $a \cdot 400$ додасться $a \cdot 30$) і в положенні 1 — 7 прямих обертів (у лічильнику додасться ще $a \cdot 7$). Отже, в лічильнику обертів буде фіксований множник (437), а в лічильнику результатів — шуканий добуток. В цьому прикладі можна обійтися й меншим числом обертів, зробивши в положеннях 3 і 2 по 4 прямих оберти, а в положенні 1 — 3 зворотних оберти:

$$a \cdot 437 = a \quad 400 + a \quad 40 - a \cdot 3.$$

При діленні a на b, щоб знайти частку з найбільшим числом десяткових знаків, треба встановити ділене в крайніх лівих віконцях лічильника результатів, перевести каретку в положення 8 (якщо в дільнику не більше 5—6 цифр), а на барабані встановити дільник або над самими лівими віконцями лічильника результатів, або на один розряд праворуч, залежно від того, чи буде перша цифра b менша або більша від першої цифри a (при однакових перших цифрах треба порівняти другі цифри і т. д.). Після цього треба погасити лічильник обертів.

Віднімаючи число b від числа, що стоїть під ним у лічильнику результатів, стільки разів, скільки буде можливо, дістанемо в лічильнику обертів першу цифру частки (якщо виконати «неможливе віднімання», тобто від меншого числа відняти більше, то залунає дзвінок і в лівих віконцях лічильника результатів з'являться дев'ятки — в цьому випадку треба прямим обертанням рукоятки відновити положення, яке було перед «неможливим відніманням»).

Потім багаторазове віднімання числа b треба виконати від числа, яке дістаємо з остачі приєднанням до нього наступної цифри числа a. Для цього каретку слід пересунути на один розряд вліво («підвести це число під число b») і, виконавши всі можливі віднімання, дістати в 7-му віконці лічильника обертів другу цифру частки. Тим же способом дістаємо і решту цифр частки.

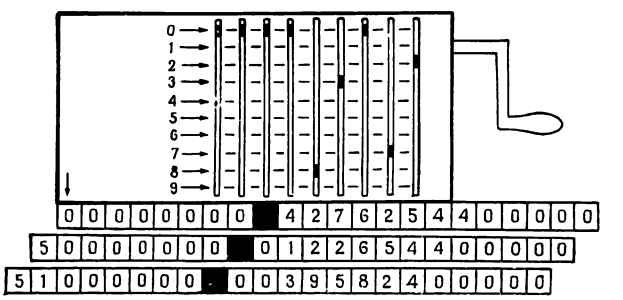


Рис. 20. Як проводиться ділення на арифмометрі.

На рис. 20 зображені вихідне положення при діленні 42 762 544 на 83 072 і покази лічильників після визначення першої і другої цифр частки.

Арифмометр належить до найпростіших і найпоширеніших малих лічильних машин. Барабан Однера використовується і в інших машинах, що мають значні конструктивні відмінності від арифмометра.

Наприклад, в лічильних машинах ВК установка цифр здійснюється по черзі на окремих колесах Однера не з допомогою установочних важільців, а натисканням на одну з десяти клавіш (рис. 21). У машинах ВК-2 лічильники залишаються нерухомими, а переміщується барабан з встановленим на ньому числом.

У багатьох машинах (наприклад на машині КСМ-1 — див. рис. 22) для встановлення чисел використовується повна клавіатура — кожний розряд обслуговується своїми десятьма клавішами.

Крім коліс Однера, в сучасних машинах застосовуються й інші дотепні пристрої для того, щоб цифрові колеса поверталися на кут, який відповідає тій чи іншій цифрі заданого числа.

Дедалі більшого поширення набувають машини з електроприводом, де обчислювачеві не доводиться витрачати зусиль на обертання рукоятки — його роботу виконує електромотор.

Є, нарешті, малі лічильні автоматичні машини, в яких досить встановити, наприклад, ділене і дільника та увімкнути мотор, щоб усі операції, включаючи і пересування каретки, і прямі оберти після виконання «неможливих віднімань», здійснювалися автоматично, без участі обчислювача.

Однак є задачі настільки трудомісткі, що навіть такі лічильні автомати не дають достатнього ефекту: хоч окремі операції виконуються

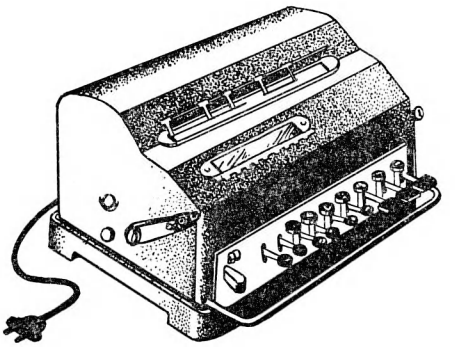


Рис. 21. Напівавтоматична десятиклавішна обчислювальна машина ВК-2.

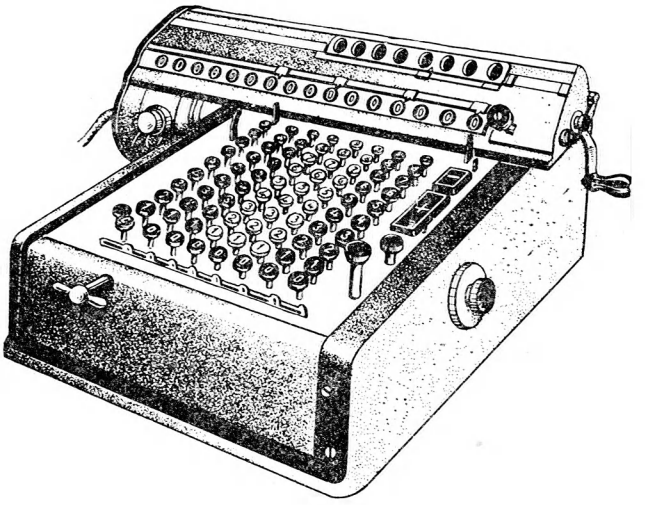


Рис. 22. Повноклавішна обчислювальна напівавтоматична машина КСМ-1.

на них і дуже швидко, але щоразу дані числа треба «ввести в машину», а на це витрачається багато часу.

У таких випадках часто велику користь можуть дати лічильно-аналітичні машини, що включають цілий комплекс машин (перфоратор, сортувалка, табулятор та ін.), кожна з яких має своє призначення. Так, на перфораторі дані числа «наносять» на картонні картки стандартних розмірів (перфокарти), пробиваючи в них у різних стовпчиках на місці тієї чи іншої цифри отвори (на рис. 23 на перфокарті нанесено число 20 367).

Машина-сортувалка, намацуючи металевою щіточкою в перфокартах, які пропускаються через неї, отвори, з допомогою електромагніту, що вмикається при цьому, сортує картки відповідно до пробитої цифри.

У табуляторі щіточки промацують отвори відразу в кількох стовпчиках і надсилають «накази», що примушують повертатися на відповідні кути цифрові

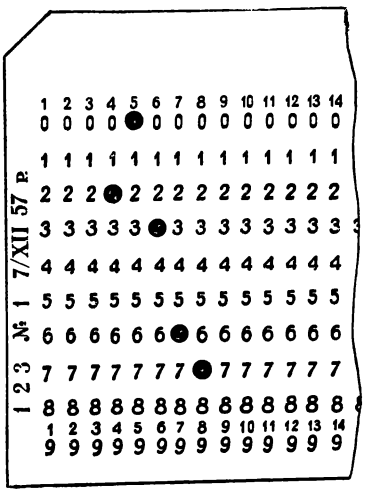


Рис. 23. Перфокарта.

колеса лічильника. На 45 стовпчиках перфокарти можуть бути нанесені 6 семицифрових чисел, які одночасно можна надіслати в 6 лічильників табулятора. Якщо, крім того, врахувати, що результати, одержувані в лічильно-аналітичній машині, сама машина може (при відповідному її настроюванні) використати для дальших обчислень, то буде зрозуміло, що деякі трудомісткі задачі така машина розв'язує дуже швидко.

На початку XX ст. лічильно-аналітичні машини застосовувалися лише для опрацювання матеріалів перепису населення. Тепер у зв'язку з винайденням додаткових машин (обчислювальний перфоратор) лічильно-аналітичні машини чимраз більше застосовуються при розв'язуванні різних математичних задач.

Але і вони поступаються щодо складності розв'язуваних задач і щодо швидкості їх розв'язування перед електронними обчислювальними машинами, винайденими близько 15 років тому.

Про те, як збудовані і працюють електронні лічильні машини, говориться в наступній статті.

ЕЛЕКТРОННІ ЛІЧИЛЬНІ МАШИНИ

Почувши слово «машина», ми мимоволі уявляємо собі деяку споруду з механічних деталей, яка або обробляє матеріали, або піднімає чи перевозить вантажі, або перетворює один вид енергії в інший. За допомогою таких машин людина, говорячи образно, надала величезної сили своїм рукам і ногам, зробила більш продуктивною свою фізичну працю.

Лічильні пристрої теж прийнято називати машинами. Але ці машини не виконують жодної силової роботи.

На найпростіших машинах люди виконують різні обчислення, розв'язують арифметичні задачі. А складніші лічильні пристрої можуть розв'язувати і найскладніші задачі вищої математики. Багато які з сучасних лічильних машин придатні навіть для розв'язування логічних задач. Як бачимо, лічильні машини — це пристрої для переробки числового матеріалу, відомостей, повідомлень, інформації. Вони у величезній мірі полегшують людям розумову працю.

Обчислювальна техніка має багату на події історію. Але особливо бурхливо вона розвивається в наш час. Дедалі численнішими і складнішими стають математичні задачі, розв'язувати які треба негайно і точно.

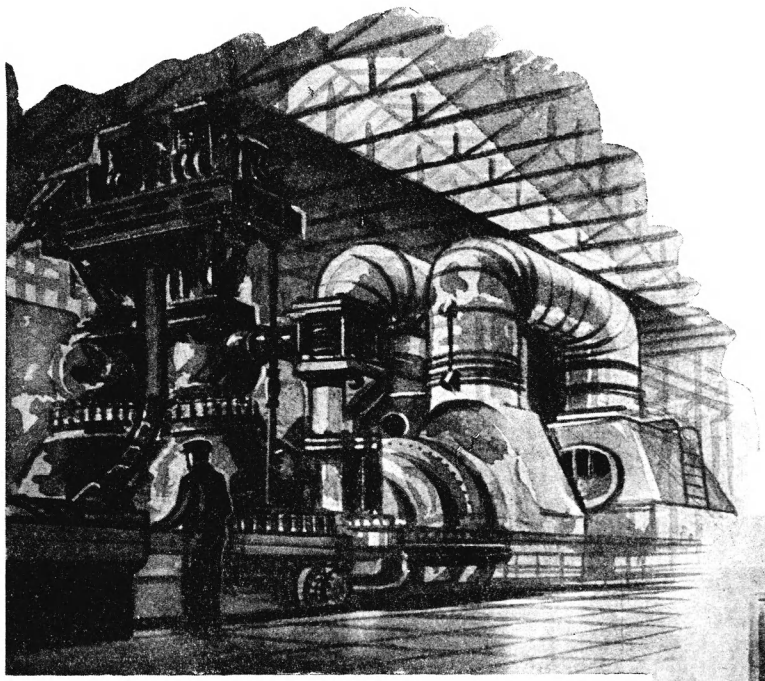
Обчислювальна техніка розвивалася і продовжує розвиватися двома шляхами. Першим з них є створення машин безперервної дії, або машин-моделей.

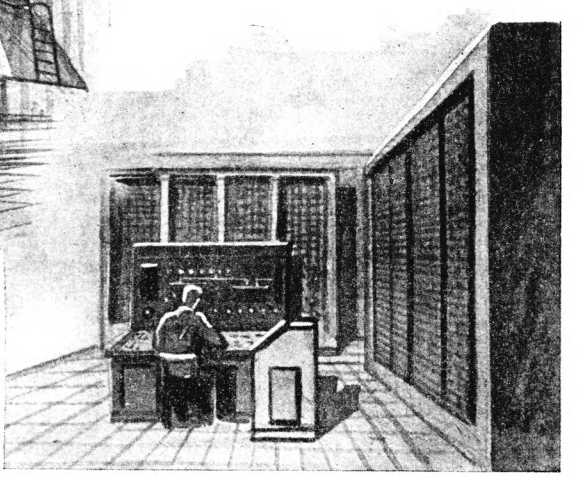
Лічильну лінійку важко назвати машиною. Але нею починається довгий перелік пристроїв безперервної дії, в кінці якого ми знаходимо сучасні електричні та електронні машини-моделі. Деякі з цих машин часто називають також інтеграторами та диференціальними аналізаторами.

Другий напрям в обчислювальній техніці — це створення машин перервної (дискретної) лічби, або цифрових машин. Звичайні рахівниці не назвеш машиною. Але вони — родоначальники великої сім'ї цифрових пристроїв. Тут ми знайдемо і звичайний ручний арифмометр, і невеликі механічні лічильні машини з електричним приводом, і складніші електрифіковані лічильно-аналітичні машини, які здатні довгий ряд дій виконувати автоматично. Є також цифрові машини, які складаються з електромагнітних реле. Але вершиною техніки перервної лічби є, звичайно, електронні цифрові машини з програмним керуванням. Ми приділимо їм далі немало уваги, а поки що повернемося до машин-моделей. У чому зміст їх роботи?

МАШИНИ-МОДЕЛІ

Часто інженерам треба встановити, як проходить певний фізичний процес, а проводити дослідження на діючій установці виявляється неможливим. У таких випадках залишається одне — зобразити його у зменшеному вигляді, зробити модель і на моделі вивчити те, що відбувається в дійсності. Майже всякий реальний процес у механіці, гідравліці, електротехніці, радіоелектроніці та багатьох інших галузях науки й техніки можна виразити мате-





Електронні машини, придатні для розв'язування логічних задач, наприклад для керування виробничими процесами.

матичною мовою — мовою формул і рівнянь. Спеціалісти в такому випадку кажуть, що процес описується математично.

Коли інженери досліджують або проектують широку електричну мережу з численними електростанціями, підстанціями і лініями електропередачі, вони звичайно користуються її моделлю, або так званим «розрахунковим столом». У моделі такої електромережі, як і раніше, вони мають справу з електричними струмами, хоч і дуже слабкими. Цей спосіб моделювання називається фізичним.

Добрим прикладом фізичної моделі може бути динамічна модель енергетичної системи. Її складають з численних малопотужних електричних машин і трансформаторів. Кожна з машин зображає цілу електростанцію або великий завод, що споживає енергію. Між частинами моделі можна робити будь-які з'єднання, потрібні для зображення дійсної електричної мережі.

Динамічні моделі дають змогу досить точно зображати і вивчати різні найскладніші процеси, які відбуваються у справжній енергосистемі. Адже це дуже важливо для правильного проектування нових потужних енергетичних об'єднань. За створення вітчизняних електродинамічних моделей акад. М. П. Костенку і проф. В. А. Венікову у 1958 р. була присуджена Ленінська премія.

Ще більш поширені моделі іншого типу — математичні. В такому пристрої досліджувана величина відмінна за своєю фізичною природою від величини, що її зображає.

Схожість між дійсним процесом і процесом у моделі полягає тільки в тому, що обидва вони описуються однаковими математичними рівняннями. Наприклад, мовою математики однаково зображаються коливання тягаря на пружині і коливання електричного струму в колі, що складається з котушки та конденсатора.

Нехай в якомусь складному процесі беруть участь різні величини: механічні, електричні, теплові тощо. Виражені рівняннями, всі вони стають «одягнутими в одну форму» — математичну.

Знаки і букви не примусиш додаватися або перемножуватися в лічильній машині. Адже це тільки знаки і букви. Отже, всі величини з нашого рівняння треба зобразити з допомогою якоїсь однієї фізично відчутної існуючої сили. Найзручніше для цього застосовувати електричну напругу. Але змінні величини і в ході процесу, і в його математичному зображенні безперервно взаємодіють одна з одною: додаються, віднімаються, перемножуються. Значить, і в нашій математичній моделі електричні напруги повинні взаємодіяти за такими ж законами і в строго заданому масштабі. Така є основна

ідея електричних моделюючих обчислювальних машин.

Для кожної математичної дії в моделі є свої пристрої. Одні з них тільки додають або віднімають електричні напруги, другі перемножують, треті виконують інтегрування і т. д. Спеціальні пристрої призначаються для добування різних складних залежностей між величинами: логарифмічної, квадратичної, синусної тощо. Перед розв'язуванням задачі потрібні пристрої (їх може бути кілька десятків) сполучають проводами один з одним у певному порядку. Результати розв'язування задач у машині виробляються також у вигляді мінливої напруги. А ця напруга, в свою чергу, записується спеціальним електричним приладом-самописцем, який зображає розв'язок задачі у вигляді кривої лінії на паперовій стрічці.

Серед існуючих машин-моделей немало електронних. Вони здатні працювати дуже швидко. Розв'язування задач на такій машині не потребує великої підготовки, а відповіді дістають у зручному для вивчення вигляді. Але поряд з багатьма перевагами у цих машинах є і два істотних недоліки, з якими далеко не завжди можна миритися. По-перше, коло задач, що доручаються навіть великій моделюючій машині, не дуже широке, і, по-друге, точність їх обмежена, а значно збільшити її неможливо. Ось чому в цілому ряді випадків машини-моделі поступаються перед машинами цифровими.

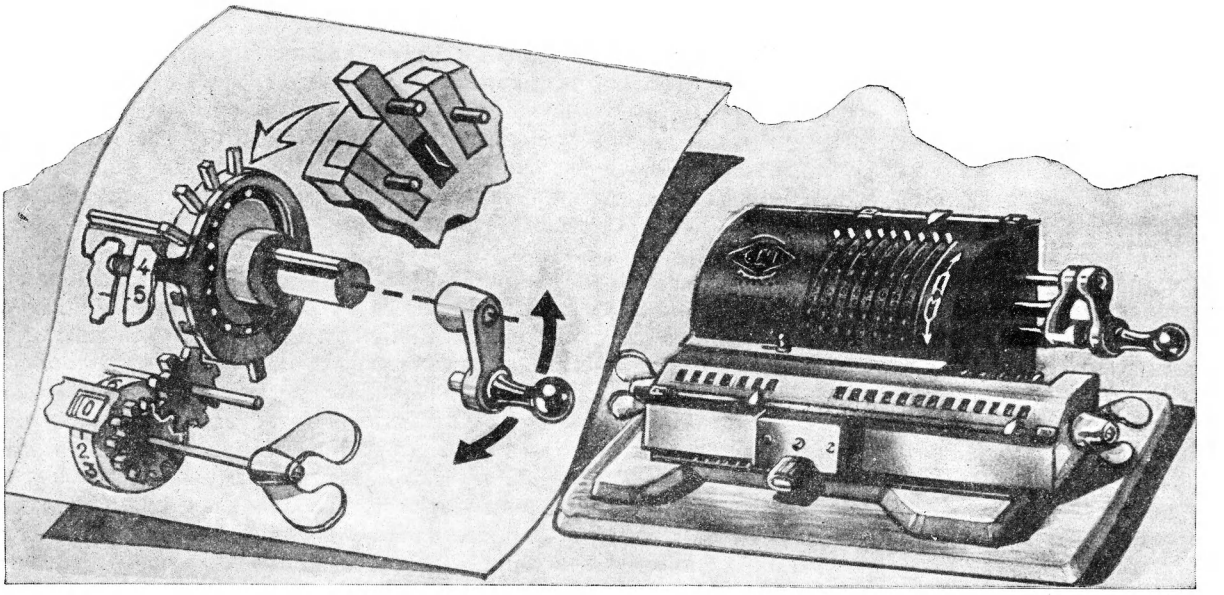
ЦИФРОВІ МАШИНИ

З попередньої статті читач уже знає, що принцип роботи механічних цифрових машин дуже простий. Їх основною частиною є спеціальні зубчасті колеса. Для цифр кожного десяткового розряду відводиться своє колесо, на якому десять зубців позначають цифри 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0. Кожне колесо з'єднується з наступним за допомогою одного лише зубця, і це відбувається тільки після того, як будуть пройдені всі цифри даного розряду.

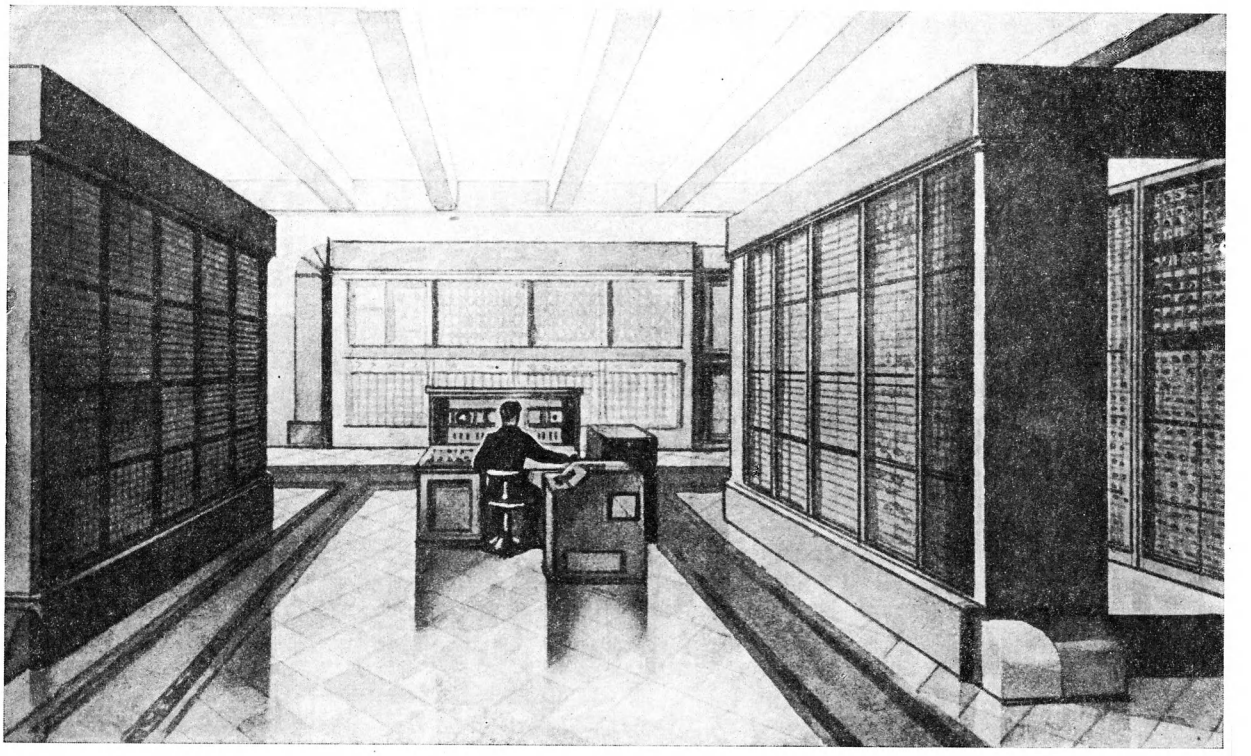
В електрифікованих лічильних машинах не треба крутити рукоятку. Натискуючи клавіші, оператор набирає ті числа, з якими йому треба виконувати дії, потім натискує клавішу «додати» або «помножити» і включає машину. Далі все робить механізм.

А що можна сказати про точність дії цифрових машин?

Щодо цього можна не турбуватися. Висока точність лежить у самій суті цифрової лічби, на чому б не виконувати дії — арифмометрі чи електронній машині. Щоб це було зрозуміло, напишемо який-небудь дріб, наприклад 0,8943. Ми легко зможемо зобразити це число в лічильній машині, якщо в ній будуть колеса десятих, сотих, тисячних і десятитисячних частин. Але як бути, коли нам потрібно буде зобразити дріб з більшою кількістю знаків, наприклад 0,89436012? Тоді просто доведеться додати ще чотири колеса, останнє з яких



Арифмометр і деякі його деталі.



Загальний вигляд електронної цифрової машини «Стріла».

відлічуватиме вже стомільйонні частини. Значить, від машини практично можна добитися будь-якої точності, збільшуючи лише кількість елементів, які є в ній.

Дуже важливу роль у розвитку обчислювальної техніки відіграла розробка принципу керування роботою цифрових машин з допомогою заздалегідь підготовлених програм. Ще в минулому столітті була винайдена перфокарта — картка з цупкого паперу з пробитими в тому чи іншому порядку отворами. Спочатку за допомогою перфокарт почали вводити в машини числа, зображувані за допомогою цих отворів. Були створені спеціальні пристрої, в яких перфокарти ощупувалися електричними контактами. Потім з допомогою перфокарт навчилися давати машині і деякі команди.

На жаль, в механічній машині неможливо автоматизувати виконання багатьох команд. Тому при обчисленнях на сучасній перфокартковій машині людині доводиться не раз втручатися в її роботу. Зате електрика, електронна техніка створили чудові можливості в справі автоматизації обчислень і застосуванні принципу програмного керування.

Механічні машини, нехай навіть і електрифіковані, лічать досить повільно. У бухгалтерії, фінансовій справі цей недолік не відчувається. Але різні галузі науки, техніки, економіки, промисловості почали висувати дедалі більш численні та різноманітні і, що дуже важливо, чимраз довші задачі. Задача в мільйон, десять мільйонів, сто мільйонів арифметичних дій стала в наш час звичайним явищем. І природно, що тільки радіоелектроніка — техніка високих частот, величезних швидкостей — дозволила розв'язати два головних завдання обчислювальної техніки: автоматизації лічби і велетенського її прискорення. Так вимоги часу привели вчених та інженерів до створення швидкодіючих автоматичних електронних машин з програмним керуванням. Перші з цих машин стали до ладу порівняно недавно — в середині 40-х років.

Вчені та інженери спочатку спрямували свої зусилля на створення універсальних великих швидкодіючих машин. У наші дні в усьому світі вони налічуються вже сотнями.

Великі цифрові машини створені і в нас. Академія наук СРСР кілька років тому

сконструювала дві такі машини. Перша з них — ШЕЛМ (швидкодіюча електронна лічильна машина), створена під керівництвом Героя Соціалістичної Праці академіка С. О. Лебедєва, у свій час була визнана найбільш швидкодіючою з європейських машин. Друга машина, названа М-2, була розроблена під керівництвом члена-кореспондента Академії наук СРСР І. С. Брука. Наша промисловість випустила серію великих машин під назвою «Стріла». Її розробку очолив Герой Соціалістичної Праці Ю. Я. Базилевський.

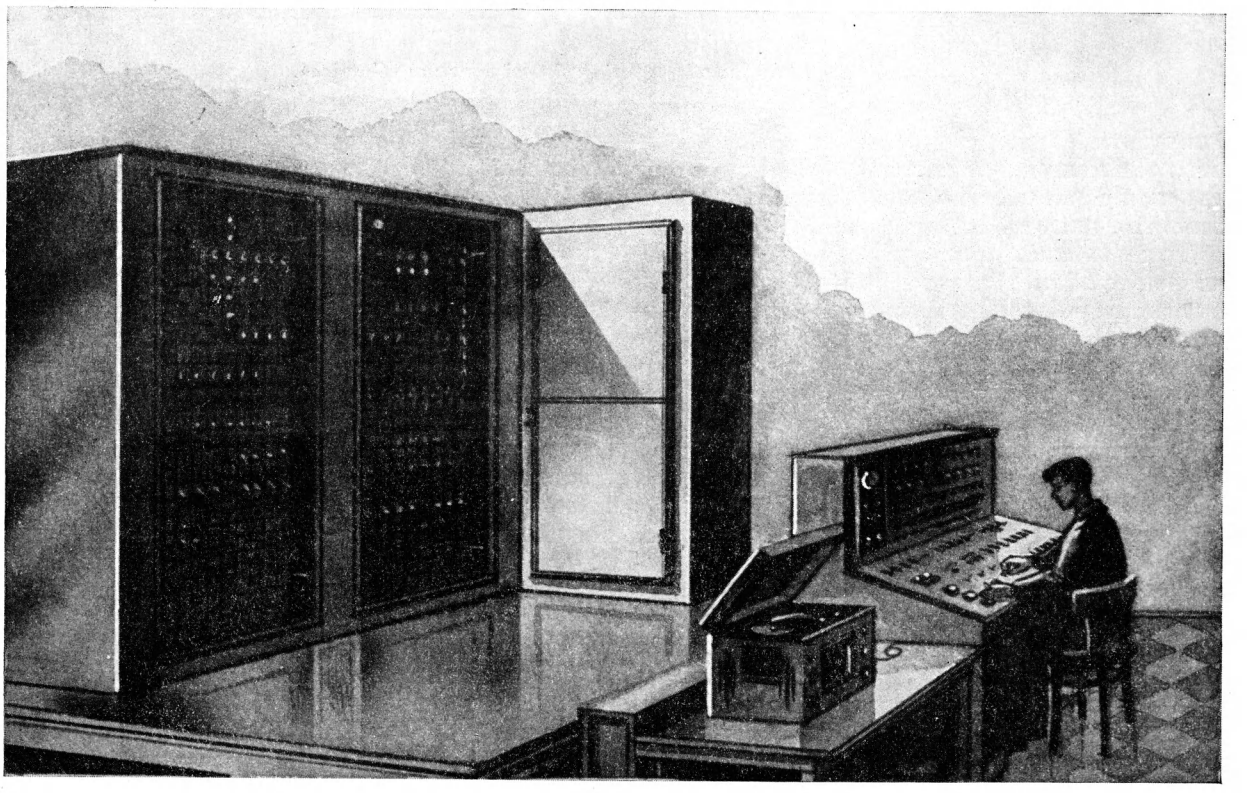
Проте великі машини дорого коштують, вони складні, потребують дуже старанного догляду і до того ж надзвичайно громіздкі. Тому в наші дні з'явилося дуже багато різноманітних, більш економічних машин середніх розмірів. Вони значно дешевші, простіші, компактніші і, незважаючи на це, придатні для розв'язування дуже багатьох задач. У світі налічується вже понад три тисячі таких машин, а їх виробництво чимраз збільшується. Недалекий той час, коли в кожному нашому науковому закладі або проектному інституті буде своя електронна машина.

СВІТ ЕЛЕКТРИЧНИХ ІМПУЛЬСІВ

У машині-моделі електричні напруги весь час змінюються безперервно і більш чи менш плавно. Величина будь-якої такої напруги відіграє вирішальну роль, бо зображає в певному масштабі деяку дійсну величину. Зате всі основні операції у цифровій машині здійснюються з допомогою короткочасних стрибків електричної напруги або струму. Ці стрибки прийнято називати імпульсами.

Коли ми рахуємо на рахівниці, нам байдуже, чи однакові кісточки, чи ні. Важливо, щоб усі вони були і щоб при лічбі ми не пропустили жодної з них. Подібно до цього не так вже небезпечно, якщо величина імпульсів буде в певних межах змінюватися. Аби відповідні лічильні пристрої вловили кожен такий імпульс.

Електричні імпульси в електронній машині є переносниками цифр, подібно до кісточок в дерев'яній рахівниці. Але кожний імпульс існує дуже малий час — кілька мільйонних часток секунди, а йдуть імпульси один за одним з величезною частотою — десятки і навіть сотні



Загальний вигляд електронної лічильної машини М-2.

тисяч за секунду. І поки ми вимовляємо слова «двадцять один», машина встигає виконати кілька тисяч повноцінних арифметичних дій.

Отже, або імпульс є, або його немає. «Так» — «ні», «1» — «0» — ось і всі відомості, які зв'язані з існуванням одного імпульсу. Звичайно, це небагато. Але якщо ці імпульси і паузи, ці одиниці і нулі брати у великих кількостях, то можна комбінувати найрізноманітніші сигнали, передавати з їх допомогою будь-які числа, будь-яку інформацію.

Однак нам важливо не тільки передавати імпульси, а й виконувати арифметичні дії. Як же це робиться в цифровій машині?

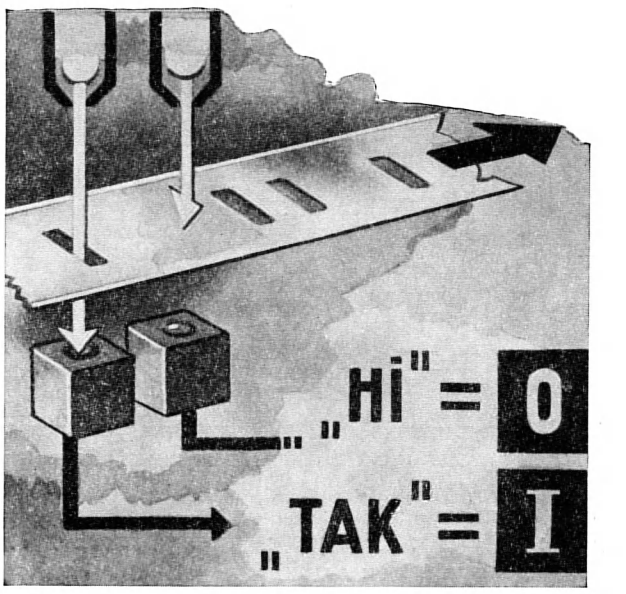
Усі ми настільки звикли до десяткової системи числення, що звичайно не уявляємо собі, як можна лічити інакше[1]. У більшості ж електронних цифрових машин застосовують не десяткову, а двійкову систему числення. Чому так?

Основними частинами машини є електронні реле-тригери. Кожен тригер — це схема, що містить звичайно дві електронні лампи і кілька радіоопорів. Тригер керується імпульсами, які надходять у схему ізовні. Нехай напруга на одній лампі висока (тоді на другій вона буде низька) — цей стан можна вважати «одиницею». Під дією імпульсу лампи тригера змінюють свій стан на протилежний. Тепер у тригері є «нуль». Тригери виконують у машині найрізноманітніші обов'язки, але найважливіший з них — лічба і зберігання чисел. І через те що можливих станів у тригера два, то вони повністю відповідають саме двійковій системі.

З таких тригерів можна складати і схеми для суто десяткової лічби. Але вони настільки громіздкі, що від їх застосування звичайно відмовляються.

Досить часто можна зустріти машини, побудовані на основі десяткової, але двійково-кодованої системи. В цьому разі кожну десяткову цифру окремо зображають з допомогою тих же двійкових знаків «0» і «1». Машина складається при цьому з двійкових комірок і працює відповідно до правил двійкової арифметики.

Отже, двійкова система числення є мовою більшості електронних цифрових машин. Ось чому є рація ознайомитися з нею ближче.



Або імпульс є, або його немає.

ПРО ДВІЙКОВУ АРИФМЕТИКУ

Десяткова система дістала свою назву тому, що для запису чисел вона користується десятьма знаками, або символами: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0. Ці знаки також становлять розряд одиниць. Далі, числа від 10 до 99 містять розряди десятків та одиниць, потім ідуть числа, що містять розряд сотень, і т. д. Звичайно ми забуваємо, як утворюються багаторозрядні десяткові числа. А складаються вони як комбінації степенів числа 10, що є основою десяткової системи. Ось, наприклад, повний запис числа 7502:

$$7502 = 7 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^2 + 0 \cdot 10^1 + 2 \cdot 10^0.$$

Коли ми записуємо число, то степені числа 10 ми опускаємо, але кожному розряду відводимо строго визначене місце.

Ці міркування ми привели для того, щоб краще зрозуміти незвичну, але дуже просту двійкову систему числення. У цій системі числа записуються з допомогою лише двох знаків: 0 і 1. Вже тому можна догадатися, що багато що у світі двійкових знаків простіше, ніж у десятковій системі. І в цьому ми незабаром переконаємося.

[1] У статті «Як люди лічили за старих часів і як писали цифри» розповідається про деякі системи числення, що застосовувалися в минулому, — трійкову, п ятіркову, дванадцяткову та ін.

А тепер розглянемо таку таблицю:

У десятковій системі		У двійковій системі
0	=	0
1	$=2^0$	1
2	$=2^1$	10
3	=	11
4	$=2^2$	100
5	=	101
6	=	110
7	=	111
8	$=2^3$	1000
9	=	1001
10	=	1010
11	=	1011
12	=	1100
13	=	1101 і т. д.

Ми бачимо, що кожного разу, коли показник степеня у двійки в лівому стовпчику збільшується на одиницю, відповідне двійкове зображення числа набуває ще одного розряду ($2^0 = 1$; $2^1 = 10$; $2^2 = 100$; $2^3 = 1000$ і т. д.), а число нулів при одиниці у двійковому запису числа стає рівним показникові степеня в його десятковому «близнюку». Ця проста залежність подібна до тієї, яку ми бачили в десятковій системі. Вона дозволяє складати з двійок у різних степенях будь-які числа, а звідси без особливих труднощів можна діставати і двійковий запис — двійковий код.

Для прикладу спробуємо записати в двійковій системі число 6:

$$6 = 4 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 0 = 2^2 \cdot 1 + 2^1 \cdot 1 + 2^0 \cdot 0.$$

Позначення двійкових розрядів 2^2, 2^1, 2^0 тепер можна опустити, зате кожному двійковому знаку ми відводимо строго визначене місце. Отже,

$$6 = 110.$$

Неважко дістати двійковий запис числа 7: у молодшому розряді — розряді одиниць додасться одиниця:

$$7 = 111.$$

За таким же зразком ми можемо дістати двійкове зображення будь-якого числа. І в кожному випадку ми матимемо справу з різними комбінаціями нулів та одиниць.

Арифметичні дії з двійковими числами надзвичайно прості: адже виконуються вони тільки над нулями і одиницями. Почнемо з додавання. Ось усі його правила:

$$0 + 0 = 0, \quad 0 + 1 = 1, \quad 1 + 0 = 1, \quad 1 + 1 = 10.$$

Не дивуйтеся останньому з цих правил: тут 10 — це не десять, а двійкове зображення числа 2.

Спробуємо застосувати на практиці ці правила і додамо два невеликих числа. Нехай це будуть 6 і 7. Напишемо в стовпчик доданки в їх десятковому і двійковому вигляді:

$$6 = 110$$
$$7 = 111.$$

Тепер почнемо по черзі додавати члени правого стовпчика:

від додавання членів правого ряду дістанемо 1
від додавання членів середнього ряду дістанемо 10
від додавання членів лівого ряду дістанемо 10
Отже: $13 = 1101$

Ось ми і дістали відповідь у вже знайомому нам вигляді.

Ну, а двійкове множення? Воно також дуже просте, і вся двійкова таблиця множення вміщується в одному рядку. Ось вона:

$$0 \times 0 = 0, \quad 0 \times 1 = 0, \quad 1 \times 0 = 0, \quad 1 \times 1 = 1.$$

Перемножимо для прикладу в двійковій системі два невеликих числа. Нехай це будуть 4 і 3. Виконуючи множення, ми повинні додержувати правил звичайної арифметики:

$\times$ 4 = 100
3 = 11
100 від множення на молодший розряд множника,
100 від множення на другий розряд множника.
Тепер додамо обидва числа за правилами двійкового додавання і дістанемо:
1100

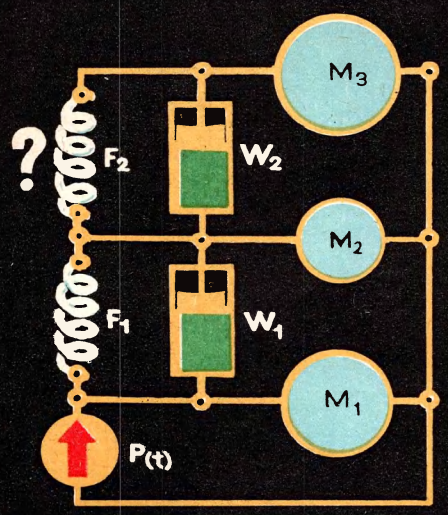
Якщо ми повернемося до таблиці двійкових чисел, то побачимо, що 1100 у двійковій системі і є зображення числа 12. Отже, множення виконано правильно.

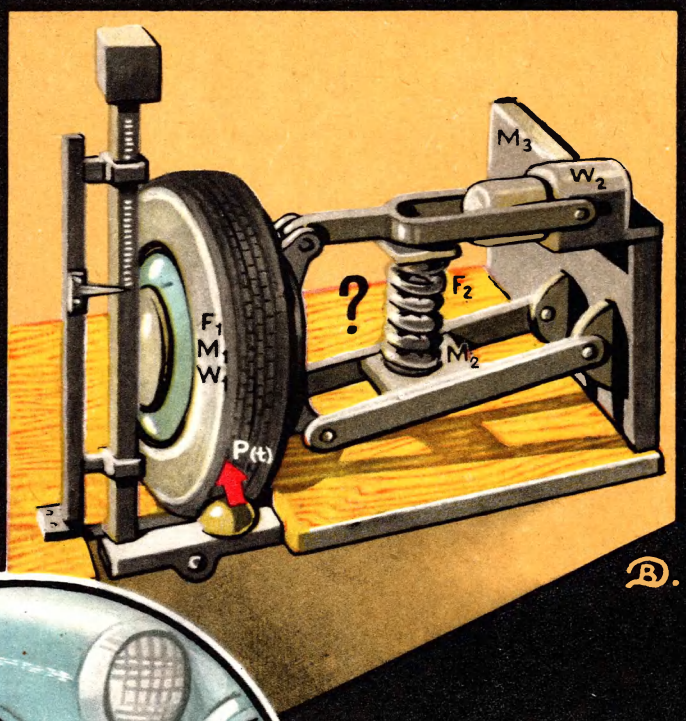
Придивимося до двох рядків, де ми записали результати множення на одиниці. Виявляється, при множенні відбувається простий зсув множеного.

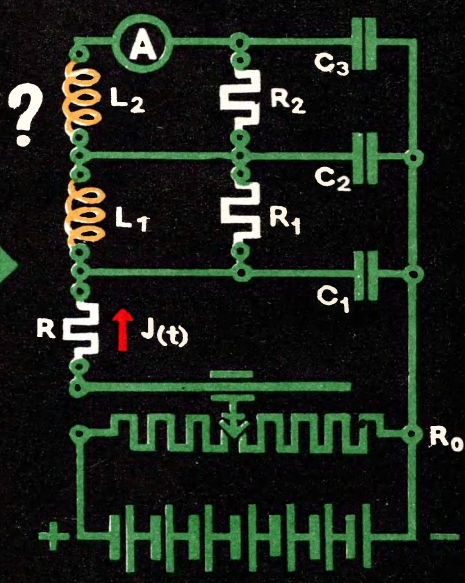
Таблиця 1. Як стиснеться пружина, якщо під колесо автомобіля попаде камінь? Відповідь на це запитання може дати фізична модель, яка складається також з пружини, тягарів і т. д., або математична модель, яка являє собою електричне коло з котушок самоіндукції, конденсаторів, реостатів тощо.

Таблиця 2 показує, як і в якій послідовності працює електронна лічильна машина.

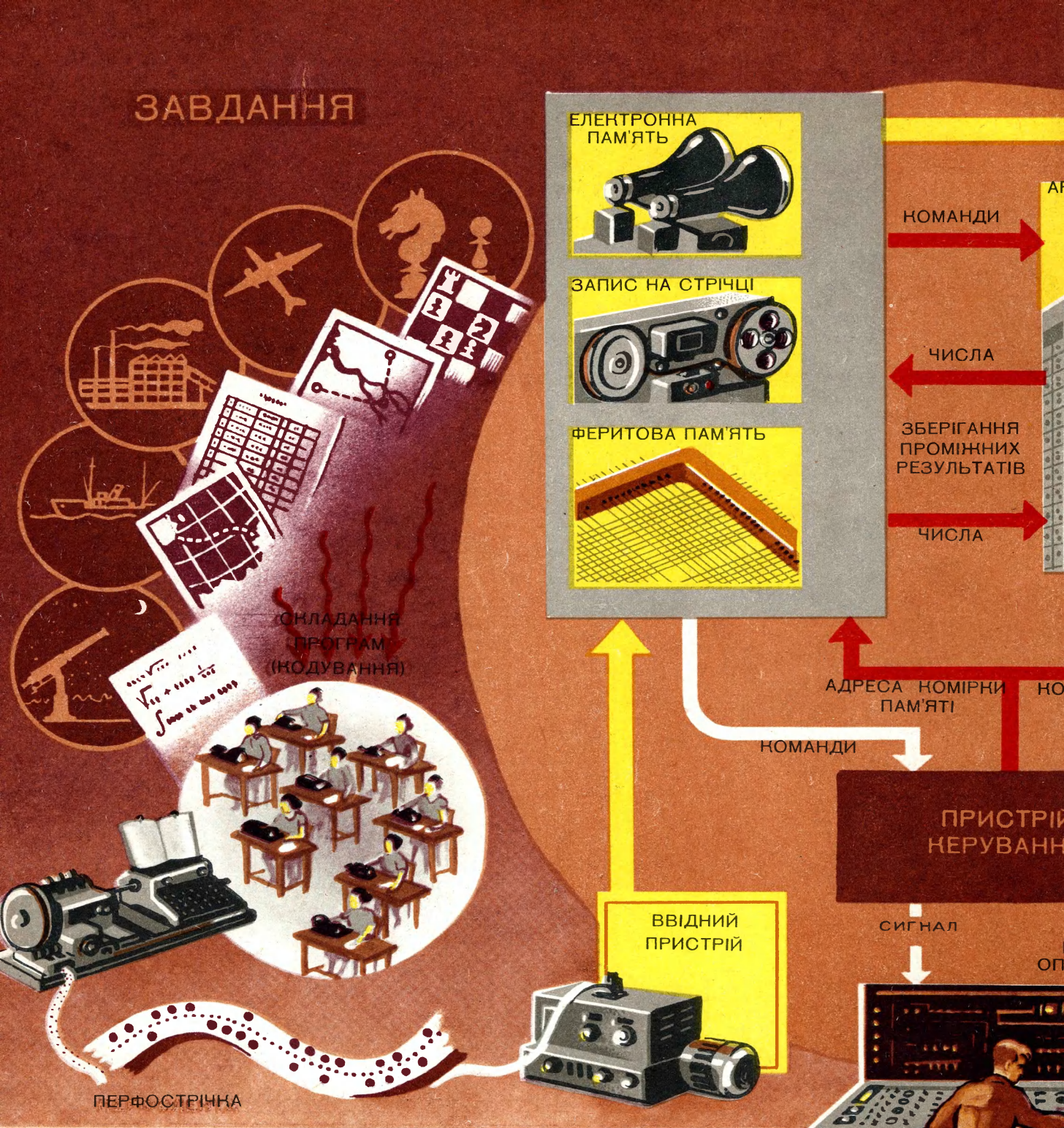
ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ







МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ



Електронні лічильні машини розв'язують найрізноманітніші математичні та логічні задачі, які виникають у багатьох галузях науки, техніки, економіки. Точність їх роботи дуже велика, а швидкість обчислень досягає тисяч і навіть десятків тисяч арифметичних операцій за секунду. Машина діє за програмою, яку складають математики-обчислювачі виходячи з умов задачі. У програмі є не тільки задані числа, а й багато команд, що їх машина повинна виконати. Резуль-

ЧИЛЬНА МАШИНА

ВИКОНАННЯ

ЕТИЧНИЙ
СТРІЙ

ТРИГЕРИ

ЕРАЦІЇ

ОЗНАКА РЕЗУЛЬТАТУ
ОПЕРАЦІЇ

ВИВІДНИЙ
ПРИСТРІЙ

НАДРУКОВАНИЙ
РОЗКОДОВАНИЙ
РЕЗУЛЬТАТ

СКЛАДАННЯ ЗАВДАНЬ
ПІСЛЯ РОЗРАХУНКІВ

ПИШУЧИЙ
АПАРАТ

тати обчислень виводяться з машини у вигляді колонок десяткових чисел. На основі цих результатів роблять наукові висновки або приймають рішення інженерного характеру. Електронні машини з великим успіхом застосовують для керування виробничими процесами, рухом транспорту і т. д. У цих випадках результат розв'язання перетворюється в електричний сигнал. Електронні машини можуть розв'язувати навіть шахові задачі.

Супутник у польоті
СЬОГОДНІ НА 15 ГОДИНУ ТРЕТІЙ РАДЯНСЬКИЙ СУПУТНИК ЗРОБИВ 14 ОБЕРТІВ НАВКОЛО ЗЕМЛІ. СЬОГОДНІ ПЕРШИЙ РАЗ ВІН ПРОХОДИВ НАД МОСКВОЮ О 12 ГОДИНІ 39 ХВИЛИН І ДРУГИЙ РАЗ БУДЕ О 18 ГОДИНІ 08 ХВИЛИН.

Якщо ми помножаємо на одиницю у другому розряді, то множене зсувається так, що його правий край потрапляє також у другий розряд. Множення на нуль фактично не дає результату.

Тому машина, виконуючи множення, зсуває множене стільки разів, скільки це потрібно, а потім додає всі результати. Отже, зсув і додавання — оце й усе, що потрібно для множення.

Двійкове віднімання також можна звести до додавання перетворених кодів, а ділення — до їх додавання і зсуву.

З ряду причин арифметичні дії в цифрових машинах вважають за краще виконувати над числами, меншими від одиниці, тобто з правильними дробами. При створенні машини конструктори враховують цю обставину. А перед розв'язуванням задачі всі вихідні числа перетворюють у дроби, помножені на деякі множники, з якими можна виконувати дії незалежно від операцій з самими дробами.

У десятковій системі це мало б досить звичний вигляд. Нехай, наприклад, нас попросили додати числа 538 і 17 у формі правильних дробів. Ми відразу написали б $0{,}538 \times \times 10^3 + 0{,}017 \cdot 10^3$, додали б дроби і тільки наприкінці розрахунку, згадавши про множник 10^3, приписали б його до результату.

Як же дістати будь-яке число у вигляді двійкового дробу і додатковсго двійкового множника? Спочатку корисно пригадати, що

у десяковій системі	у двійковій системі
0	0
$1 = 2^0$	1
$2 = 2^1$	10
$4 = 2^2$	100
$8 = 2^3$	1000 і т. д.

А тепер неважко зрозуміти і таку таблицю:

0	0
$1 = 2^0$	1
$\frac{1}{2} = 2^{-1}$	0,1
$\frac{1}{4} = 2^{-2}$	0,01
$\frac{1}{8} = 2^{-3}$	0,001
$\frac{1}{16} = 2^{-4}$	0,0001 і т. д.

Ні в якому разі не можна забувати, що дроби, зображені в правому стовпчику, двійкові, а не десяткові. Тому дріб 0,001 — це не одна тисячна, а двійкове зображення простого дробу $\frac{1}{8}$.

З допомогою наведених таблиць ми можемо зображати у двійковій системі різні прості дроби, в яких знаменник являє собою степінь числа 2. Наприклад, дріб $\frac{3}{8}$ набере такого вигляду: 0,011. І це неважко зрозуміти. Адже $\frac{3}{8} = \frac{1}{8} \cdot 3$, але $\frac{1}{8}$ зображається як 0,001, а 3 у двійковій системі має вигляд 11. Множення 0,001 на 11 і дає 0,011.

Тепер ми без особливих труднощів з певною точністю зможемо зобразити будь-яке число у вигляді двійкового дробу і деякого, також двійкового, множника. Нехай це буде число 27. Складемо його з двійок у різних степенях.

$$27 \quad 8 + 2 + 1 = (2^4 + 2^3 + 2^1 + 2^0).$$

Поділимо обидві частини рівності на найближчий більший, ніж число 27, степінь двійки. Це буде число $32 = 2^5$ (коли б ми поділили на 2^4, то шуканий дріб був би неправильний). Отже, ділимо:

$$\frac{27}{32} = \frac{16 + 8 + 2 + 1}{32},$$

або

$$\frac{27}{32} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32}.$$

Помножимо тепер обидві частини рівності на 32, щоб знову виділити число 27, яке цікавить нас:

$$27 = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32}\right) \cdot 32.$$

На підставі таблиці двійкових дробів ми маємо право написати:

у десятковій системі	у двійковій системі
$\frac{1}{2}$	0,1
$\frac{1}{4}$	0,01
$\frac{1}{16}$	0,0001
$\frac{1}{32}$	0,00001

Таблиця 3. Спостерігачі фіксують положення супутника або ракети на небесній сфері і передають одержані дані в обчислювальний центр. Туди ж надходять радіосигнали, які надсилає супутник або ракета. Електронна лічильна машина з великою швидкістю розраховує орбіту, по якій супутник чи ракета рухатимуться далі. Ця ж машина обробляє показання вимірювальної апаратури, яку несе в собі космічний апарат.

Додавши рядки правого стовпчика, ми дістанемо 0,11011. Залишилося закодувати множник 32. Пригадаємо, що $32 = 2^5$. Але у двійковій системі 2 зображається за допомогою одиниці і нуля як 10, а 5 має вигляд 101.

Тепер ми можемо остаточно записати десяткове число 27 за допомогою двійкового дробу і двійкового множника:

$$27 = 0{,}11011 \cdot 10^{101}.$$

Права частина цієї рівності являє собою комбінацію тільки нулів та одиниць. Правильний дріб типу 0,11011 математики називають **мантисою** числа, а показник степеня двійки, який у нашому прикладі має вигляд 101,— його **порядком**. Так опрацьовують всі вихідні числа, перш ніж машина почне лічити.

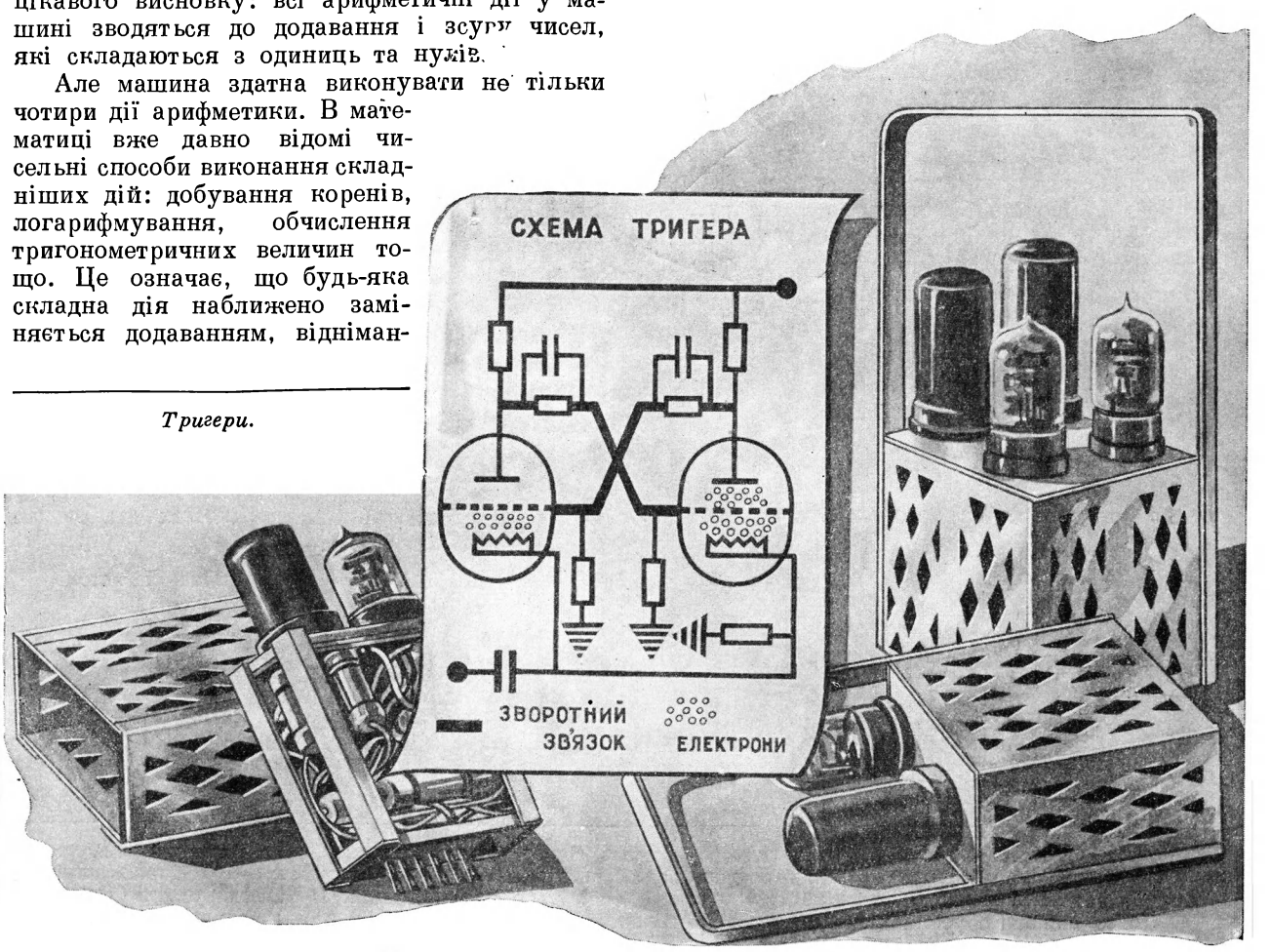
У результаті наших занять двійковою арифметикою ми прийшли до дуже важливого і цікавого висновку: всі арифметичні дії у машині зводяться до додавання і зсуву чисел, які складаються з одиниць та нулів.

Але машина здатна виконувати не тільки чотири дії арифметики. В математиці вже давно відомі чисельні способи виконання складніших дій: добування коренів, логарифмування, обчислення тригонометричних величин тощо. Це означає, що будь-яка складна дія наближено заміняється додаванням, відніманням, множенням і діленням за певними правилами, а результат можна дістати з дуже великою точністю, незважаючи на те, що він є наближеним.

Вчені вміють зводити до простих арифметичних дій багато дуже складних задач вищої математики. Машина діє в десятки тисяч разів швидше, ніж людина, і їй під силу навіть такі задачі, розв'язувати які до винайдення машин люди взагалі не могли, бо ці задачі потребували величезної затрати часу.

«АНАТОМІЯ» ЦИФРОВОЇ МАШИНИ

Отже, на електронне реле, або тригер, у машині покладаються відповідальні обов'язки. Ланцюжки таких реле (регістри) з величезною швидкістю нагромаджують і зберігають многорозрядні двійкові числа. Але самих реле для виконання всіх потрібних дій не досить.



Тригери.

Є в машині дуже важливі пристрої, які називаються логічними схемами. Ці схеми складаються із звичайних радіодеталей, і часто в них навіть не буває електронних ламп.

Логічні комірки різних типів називають відповідно до їх обов'язків словами «ні», «і», «або». У кожній такій комірці є один або кілька ланцюгів, через які подаються імпульси. Це — «вхід» комірки. Комірка має також і «вихід» — ланцюг, який надсилає в інші частини машини створений коміркою сигнал.

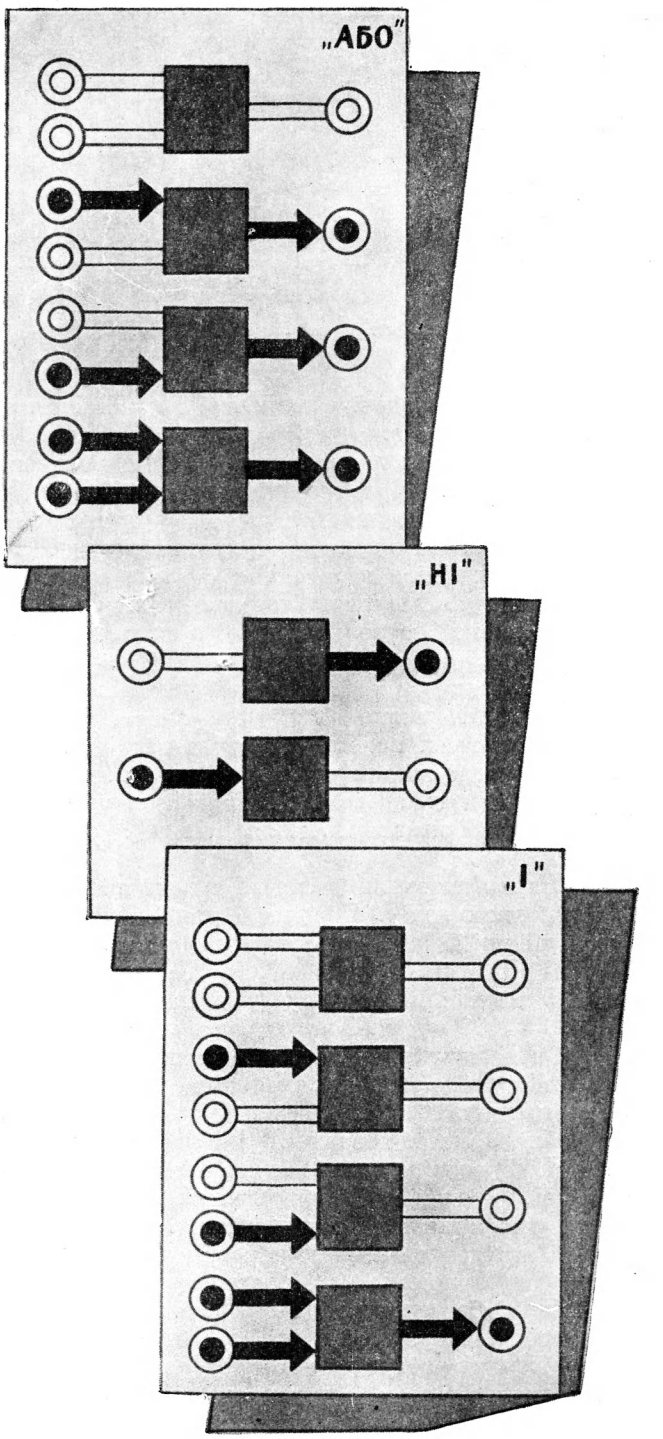
Якщо в схему «ні» надійде імпульс, то сигналу на виході не виникне. І, навпаки, якщо на вході не буде сигналу, схема виробить імпульс. Схема «і» виробляє сигнал тільки тоді, коли імпульси з'являються одночасно на всіх її входах. Нарешті, на виході схеми «або» сигнал виникне при надходженні імпульсу або на один з входів, або на кілька, або на всі відразу. Часто застосовуються комірки «і» та «або» з двома входами.

З численних електронних реле і логічних комірок складається арифметичний вузол машини — своєрідний електронний арифмометр, який і виконує всі дії з імпульсними кодами чисел за правилами двійкової арифметики. Яка ж точність, з якою працює арифметичний вузол і машина в цілому? Кількість розрядів двійкових чисел, з якими оперує машина, може становити від 30 до 40. Це відповідає в середньому 10 мільярдам у десятковій системі. Отже, машина лічить з величезною точністю — до однієї десятимільярдної і навіть вище.

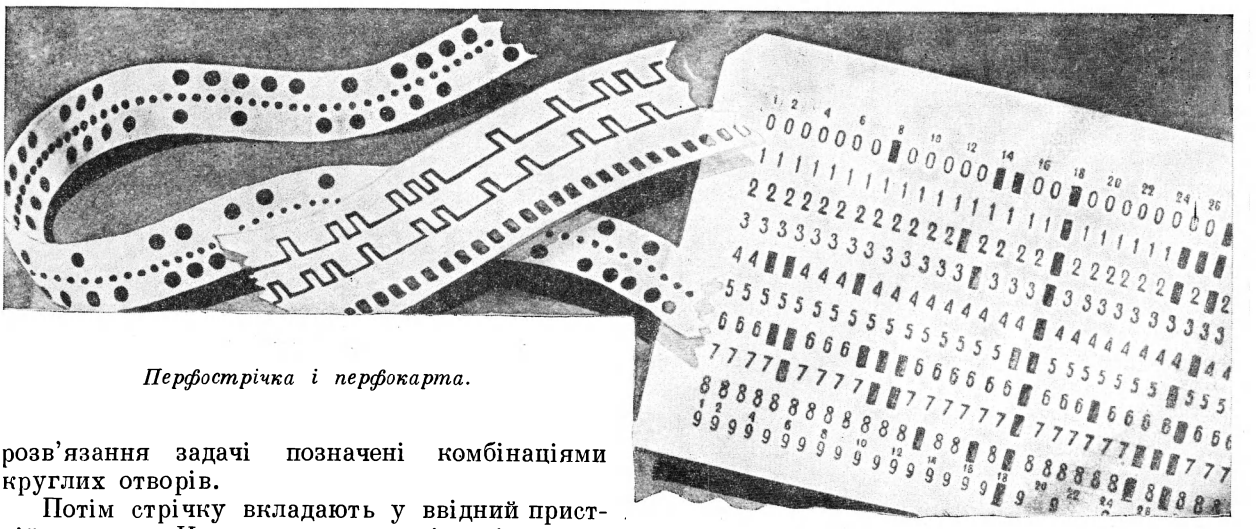
Крім арифметичного вузла, в електронній лічильній машині є ще чотири дуже важливих пристрої, без яких її робота була б немислима. Насамперед це ввідний пристрій, що дає можливість перейти від мови букв та цифр до мови імпульсів, тобто ввести задачу в машину.

Перш ніж ввести задачу в машину, математики виконують велику роботу, складаючи програму розв'язання задачі. Це не просто перелік усіх вихідних чисел, а й список команд, які машина повинна виконати. Потім програму переносять з допомогою спеціального приладу — перфоратора на перфострічку. І не тільки числа, а й команди згодом «оживуть» у машині у вигляді електричних «нулів» та «одиниць».

Оператор, який працює на перфораторі, робить приблизно те саме, що й друкарка: дивлячись на список чисел і команд, він стукає по клавіатурі апарата. А збоку з перфоратора виповзає готова перфострічка, де умови



Логічні комірки різних типів.



Перфострічка і перфокарта.

розв'язання задачі позначені комбінаціями круглих отворів.

Потім стрічку вкладають у ввідний пристрій машини. Натиснули кнопку, і стрічка, захоплювана моторчиком, починає рухатися між електричною лампочкою і фотоелементами. Через кілька десятків секунд стрічка «зчитана» і вся задача у вигляді електричних імпульсів, вироблених фотоелементами, пішла в запам'ятовуючий пристрій — «пам'ять». Це — третя, надзвичайно відповідальна частина машини.

Вихідні умови будь-якої задачі складаються з чисел і команд. У ході розв'язування задачі можуть виходити нові числа, які потрібні будуть згодом. Машині весь час доводиться зберігати їх. Для цього і потрібна «пам'ять».

Запам'ятовуючі пристрої в машині можуть бути двох видів. Першим і найважливішим є внутрішній, або оперативний, запам'ятовуючий пристрій.

У сучасній машині він може зберігати 2000—4000 чисел. Але творча думка конструкторів наполегливо прагне збільшити місткість «пам'яті» до 10—20 тисяч чисел. Адже від цього залежить здатність машини розв'язувати особливо складні задачі.

При розв'язуванні задач оперативній «пам'яті» доводиться безперервно працювати, тому вона повинна бути швидкодіюча.

Ще недавно як внутрішню «пам'ять» найширше використовували обертові магнітні барабани та електронно-променеві трубки. В барабані числа зберігають, намагнічуючи дуже дрібненькі частинки його поверхні, а в електронних трубках — у вигляді електричних зарядів на спеціальному шарі, що наноситься на екран трубки і не проводить струму. Будь-який запам'ятовуючий пристрій має також підсилювачі та керуючі схеми.

Останнім часом була винайдена феритова «пам'ять», в якій числа зберігаються у вигляді магнітних станів мініатюрних магнітиків.

Один шар феритової «пам'яті» — це своєрідна тканина з великої кількості дротинок, на перетинах яких розміщені феритові осердя — кільця, виготовлені з спеціального магнітного порошку. Така «пам'ять» дуже надійна, має здатність швидко діяти і з часом дасть змогу зберігати багато тисяч чисел.

Другий вид «пам'яті» — зовнішній, або довгочасний, запам'ятовуючий пристрій. У ньому зберігаються числові коди, які потрібні при роботі машини досить рідко. Найзручніші для зберігання величезної кількості двійкових кодів магнітні стрічки — ті самі, які застосовуються в магнітофонах. На них можна зберігати багато сотень тисяч чисел.

Наступним дуже важливим вузлом машини є керуючий пристрій. Без нього машина не могла б працювати. Адже всіма операціями в ній треба керувати і керувати без втручання людини. Як же цей пристрій може розумно керувати всіма частинами такого складного апарата, як електронна цифрова машина?

Люди заздалегідь дбають про те, щоб і керуючий пристрій, і машина в цілому діяли узгоджено. Для цього, як ми говорили, ще до початку обчислень в машину надсилають не тільки всі вихідні числа, а й необхідні команди. Кожна команда має приблизно такий вигляд: «Взяти числа A і B з таких-то комірок «пам'яті», виконати з ними таку-то дію, результат направити в таку-то комірку «пам'яті». Одна з наступних команд використовує одержаний результат і виконує над ним нову операцію

і т. д. Команди надходять у машину у вигляді двійкових чисел.

Керуючий вузол розшифровує кожну таку команду і, підпорядковуючись їй, створює шляхи для імпульсів тільки в потрібному напрямі. Складається він з уже знайомих нам електронних реле, лічильників імпульсів та логічних комірок.

Але ось задачу розв'язано машиною, і в «пам'яті» готова остаточна відповідь. Тоді вступає в дію п'ятий вузол машини — вивідний пристрій, найважливішою частиною якого є друкарський апарат. Це він дає нам відповідь у вигляді таблиць з букв і десяткових чисел.

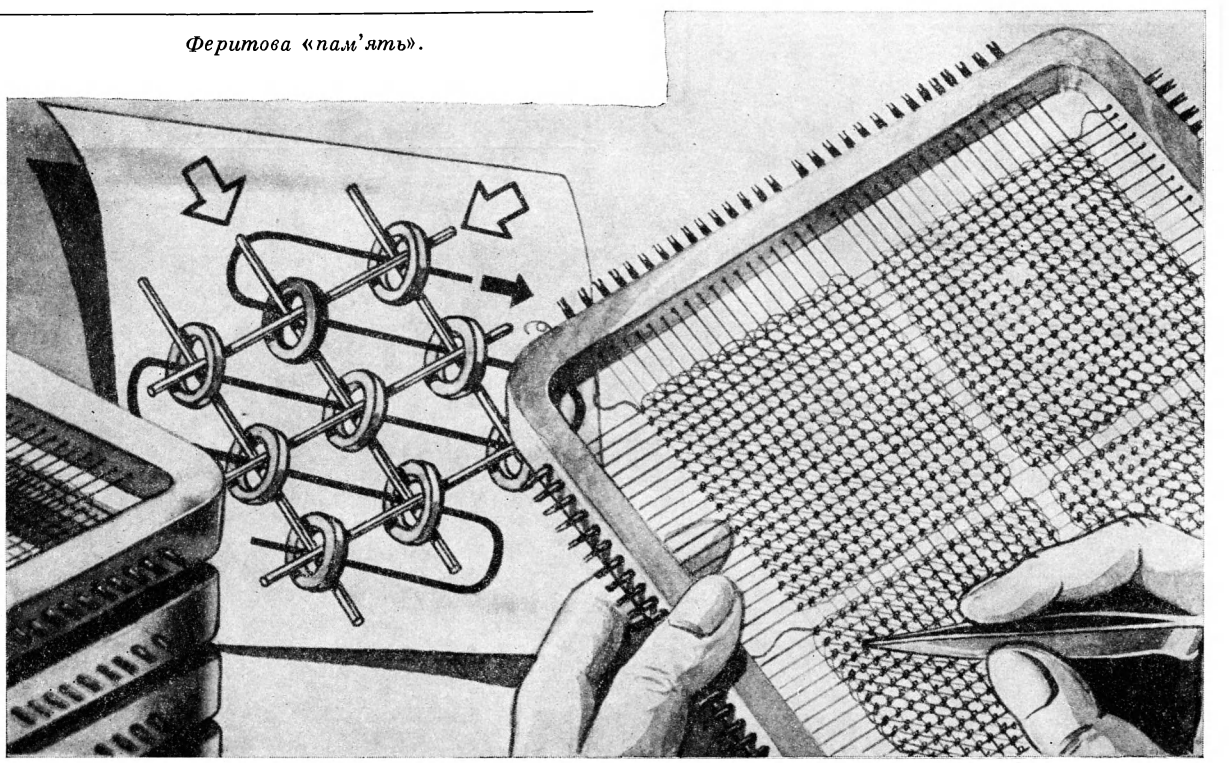
ЧУДОВІ ВЛАСТИВОСТІ ЦИФРОВОЇ МАШИНИ

Не можна не сказати про дві надзвичайно важливі особливості цифрових машин, які дають змогу образно назвати ці пристрої «думаючими». Нам тепер відомо, що команди, які керують машиною, мають вигляд двійкових чисел. Виявляється, можна програму роботи скласти так, що машина не тільки підпорядковуватиметься командам, а й виконуватиме над ними ... арифметичні дії. В результаті цих дій машина дістане нову команду, яку вона сама ж потім і виконає. Отже, машина здатна сама виробляти собі накази на майбутнє. Як же це відбувається?

Машина без особливих труднощів може порівнювати два числа. Це не виходить за рамки звичайної арифметики. Але із здатності порівнювати випливає друга надзвичайна властивість машини. Виявляється, машина може переходити від одного способу розрахунку до іншого, якщо порівняння двох чисел покаже, що такий перехід треба зробити. При цьому арифметичний пристрій надсилає сигнал у вузол керування, який змінює команду і примушує машину лічити по-новому. Ось ці особливості цифрових машин надають їх роботі надзвичайної гнучкості, роблять їх універсальними, здатними розв'язувати найрізноманітніші задачі. Звичайно, така «розумна» поведінка машини заздалегідь визначається програмою.

Отже, цифрова машина має чудову здатність вибирати правильні шляхи для своєї роботи, виробляти для себе нові накази і перебудовуватися в ході обчислень. Як бачимо, робота машини, що має програму, до деякої міри нагадує діяльність людського мозку.

Феритова «пам'ять».



Ми вже згадували про величезну швидкість обчислень на електронних машинах. Тепер ми знову повернемося до цієї важливої їх властивості. Середня швидкість роботи сучасних машин — 5—8 тисяч дій за ... секунду. Але зараз іде боротьба за ще вищі швидкості. Вже є машини, здатні виконувати за секунду 30—60 тисяч дій. І недалекий той час, коли швидкість обчислень на деяких нових машинах перевищить 100 тисяч операцій за секунду. Однак у масовому масштабі навряд чи є рація прагнути до цього, бо збільшення швидкості коштує недешево. У звичайних машинах цілком можна задовольнятися 2 або 3 тисячами дій за секунду.

Але що означають ці тисячі? Зараз ми маємо право твердити, що цифрова машина працює в 10 тисяч раз швидше, ніж людина з арифмометром. Отже, всю роботу рахівника за день машина може виконати за... 3 секунди. А протягом одного дня машина справляється з розрахунком зарплати для 25—30 тисяч чоловік, які працюють на великому підприємстві.

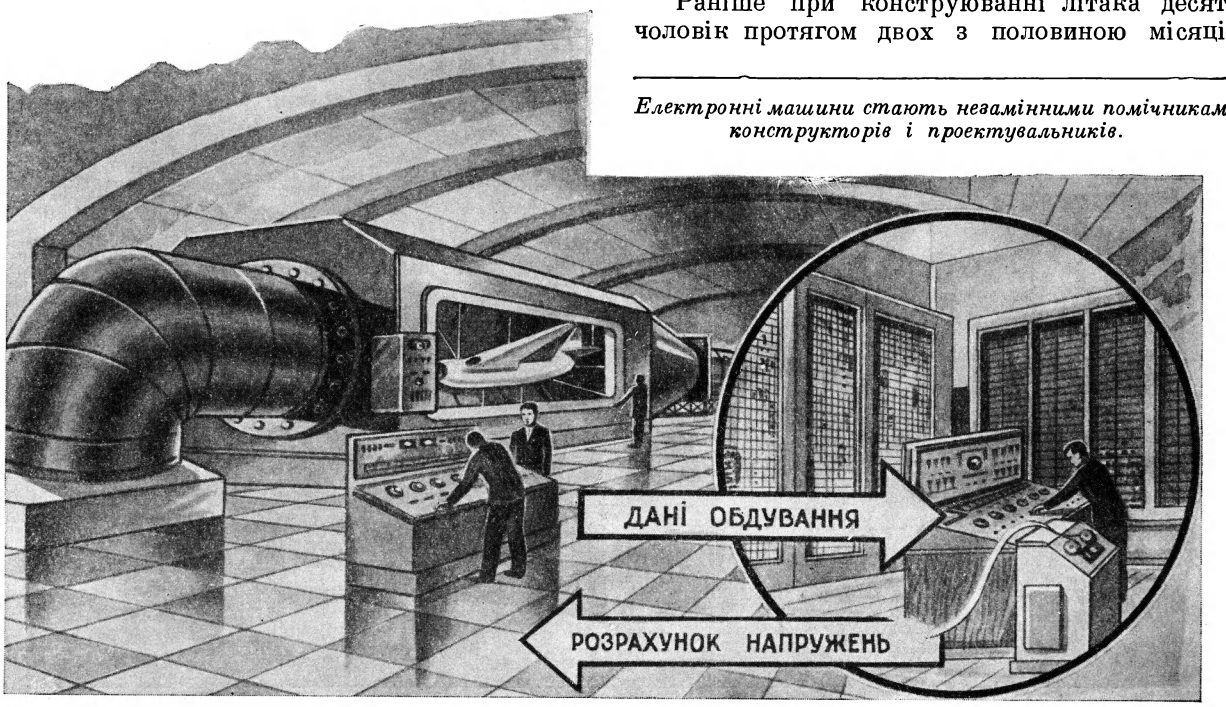
ЦИФРОВА МАШИНА ПРАЦЮЄ

Можливості застосування цифрових машин невичерпні. Машини вже допомогли перевірити багато надзвичайно трудомістких астрономічних розрахунків, які провадилися раніше протягом десятиліть і навіть віків. Потрібно, наприклад, всього 500 годин — не набагато більше двадцяти діб, щоб машина на чверть століття вперед визначила всі рухи всіх планет сонячної системи. Але ж, крім великих планет, науці відомо ще кілька тисяч малих — астероїдів.

Ми є сучасниками чудового початку освоєння Космосу. І в цій справі на електронні цифрові машини покладають великі і різноманітні завдання. Радянськими вченими був проведений запуск космічних кораблів-супутників Землі. Читаючи в газеті повідомлення про траєкторію польоту корабля-супутника, ми впевнені, що він з'явиться над нашою головою у точно призначений час. Хто ж зумів так точно передбачити політ маленького штучного місяця? Звичайно, цифрова машина.

Машини стають незамінними помічниками конструкторів і проектувальників. Щоб знайти правильне рішення, інженерам часто доводиться протягом багатьох місяців і навіть років розраховувати десятки варіантів якої-небудь конструкції або споруди. Машина ж за кілька хвилин або годин може розрахувати всі ці варіанти. А якщо у програму її роботи «закласти» числову оцінку, спільну для всіх варіантів, то машина сама вибере найкращий із них.

Раніше при конструюванні літака десять чоловік протягом двох з половиною місяців



Електронні машини стають незамінними помічниками конструкторів і проектувальників.

розраховували коливання його частин. А машина з цією роботою справляється за... півгодини.

Цифрові машини допомагають визначати затрати грошей та матеріалів при будівництві, розв'язують найскладніші задачі, що виникають при вивченні атомного ядра, і навіть завбачують погоду.

Але це далеко не все. Вчені та інженери переконливо довели, що цифровій машині можна доручати взагалі будь-яку розумову роботу, що проходить за строго визначеними правилами. Треба лише знайти ці правила, виразити їх у вигляді математичної таблиці — а л г о р и т м у і ввести в програму. І тоді цифрові машини перестають бути просто обчислювальними пристроями. Вони починають розв'язувати... логічні завдання. Ця дуже цікава властивість цифрових машин грунтується на законах математичної логіки.

Дуже різноманітні логічні завдання, розв'язання яких доручають тепер цифровим машинам. Тут і складання розкладів руху поїздів, і керування рухом поїздів на великих вузлових станціях, і складання графіків прибуття та вильоту літаків в аеропортах, і сортування книжок за картотекою у великих бібліотеках, і багато іншого.

Мабуть, найдивовижнішим з логічних завдань є автоматичний переклад тексту з однієї мови на іншу. Необізнаній людині важко повірити, що машина може бути перекладачем. І все ж це реальний факт.

У січні 1954 р. в Нью-Йорку відбулася перша публічна демонстрація машинного перекладу з російської мови на англійську, а наприкінці 1955 р. в Москві на машині БЕСМ був успішно проведений перший з цілої серії дослід автоматичного перекладу з англійської мови на російську.

Машинний переклад став можливим тому, що мовознавцям вдалося встановити ті формальні правила, які зв'язують дві різні мови. А від цих правил вже було неважко перейти до програми. Але з словами і буквами машина не вміє поводитися. Тому для буквеного тексту застосовують цифрову двійкову форму запису, так само як це робиться в телеграфії, де звичайно користуються кодом Бодо.

Ось як кодуються перші букви латинського алфавіту: *a*—16, *b* — 06, *c* — 22, *d* — 30 і т. д. Цифрової форми можна надати і буквам російського алфавіту, причому букви, які вимовляються однаково різними мовами, записуються одним цифровим кодом.

Для англійського слова «bad» — «поганий» ми дістанемо такий числовий запис: 06 16 30. Але і з десятковими числами машина не вміє оперувати. Тому в «пам'ять» машини це число потрапляє в суто двійковому вигляді:

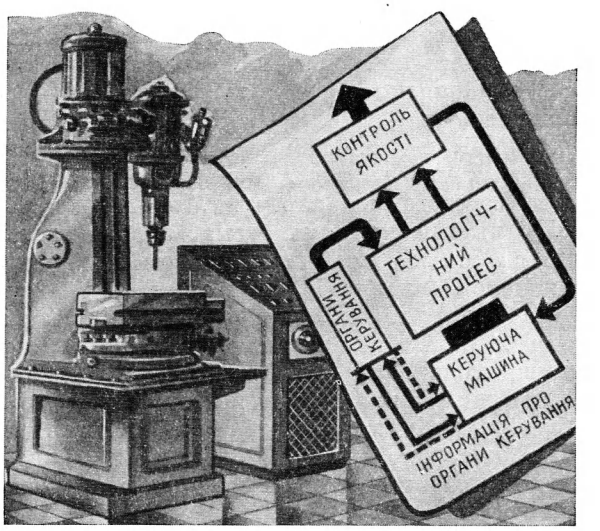
0000 0110 0001 0110 0011 0000.

Тут кожна четвірка з нулів та одиниць зображає один десятковий знак.

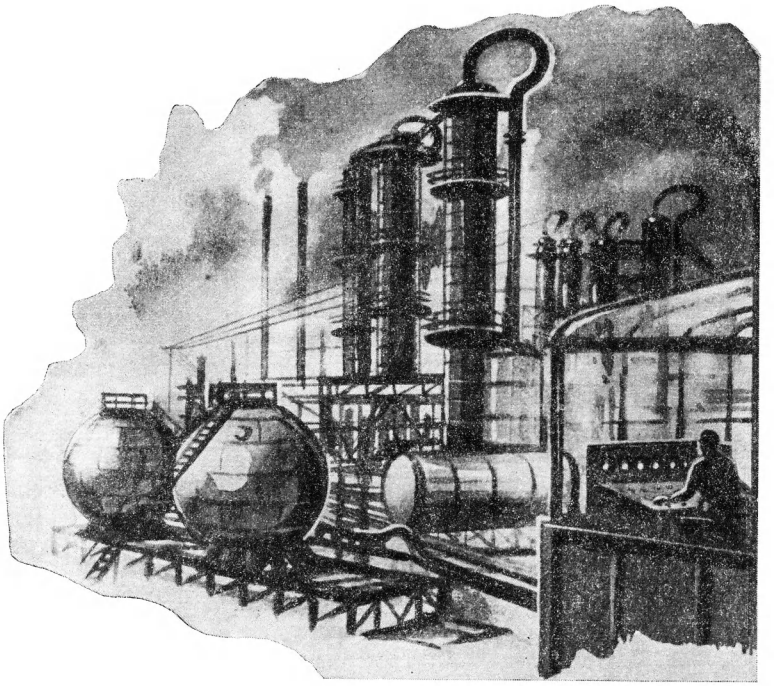
Такого ж незручного для читання, але необхідного для перекладу двійкового вигляду набувають у машині і інші слова.

Мовознавці і математики-програмісти заздалегідь забезпечують «пам'ять» машини словником, що містить російську та іноземну частини. Російські та іноземні слова однакового значення містяться в комірках під одним і тим же номером. Машина при перекладі повинна порівнювати цифрові коди чисел і відшукувати однакові. Мовознавці «навчили» машину справлятися і з такими «неприємностями», як граматичні правила, відмінювання, дієвідмінювання тощо.

Сучасні машини перекладають лише дуже прості тексти, і то не швидше, ніж людина. Але боротьба за удосконалення машинного перекладу триває. Вчені та інженери мріють про створення спеціальних машин-перекладачів. І, безперечно, автоматичний переклад з часом завоює загальне визнання. Однак не



Електронна машина керує роботою верстата.



Електронна машина заміняє працю великої кількості людей на нафтопереробному заводі.

можна надмірно захоплюватися цим: машина ніколи не зможе замінити людину в такій справі, як переклад художньої літератури.

Цифрові машини можуть грати в такі логічні ігри, як карти, доміно та шахи. Машині з успіхом можна доручати також вирішення завдань з економіки та планування, з постачання і навіть з воєнної стратегії. Нарешті, перед електронними цифровими машинами відкривається ще одне неосяжне поле діяльності — виробництво.

Машині, оснащеній вимірювальними та виконавчими пристроями, довіряють тепер керування верстатами, апаратами, конвейєрами і навіть цілими підприємствами. Людині залишається тільки контролювати роботу такої досконалої, «мислячої» автоматики.

На одному заводі керуючу машину використали в ролі фрезерувальника. Деталь, яку раніше людина обробляла протягом 14 днів, електронний фрезерувальник виготовив за... 1 годину. На іншому заводі обробка однієї точної деталі займала 3 тижні. Цю ж роботу верстат, керований цифровою машиною, виконує за 2 години.

У наші дні керуюча машина з бездоганною точністю працює як аеродромний диспетчер. Будучи «мозком» найскладнішої автоматичної системи, оснащеної радіолокаторами, вона без допомоги людей одночасно командує посадкою кількох літаків.

На нафтопереробному заводі, де «повновладним розпорядником» є також керуюча машина, ми зовсім не знайдемо людей. На заводі радіоапаратури, побудованому за спеціальним проектом, також все роблять автомати, якими керують цифрові пристрої. Тут працює всього два чоловіка. Вони тільки стежать за справністю автоматики.

Цей перелік можна було б продовжити і далі. Але ж епоха керуючих машин тільки починається. Що ж дадуть людям електронні лічильні машини, коли настане період їх «зрілості», коли вони будуть ще більш швидкими і надійними? Тут уже відкривається великий простір фантазії.

Конструктори наполегливо працюють над поліпшенням якості електронних машин. Машини повинні бути абсолютно надійними, займати небагато місця і споживати мало електроенергії. Від машин майбутнього потрібна буде також здатність до саморемонту. Як бачимо, вимоги ставляться дуже серйозні. Тому обчислювальна техніка невідкладно використовує всі ті визначні досягнення фізики, радіотехніки, електроніки, які можуть бути для неї корисні.

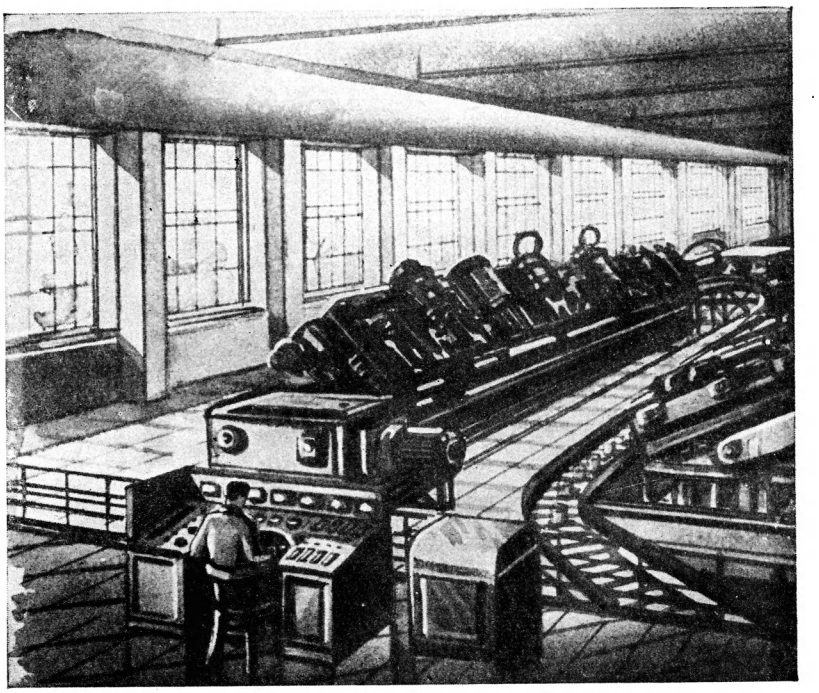
Вже тепер у машинах широко використовуються найновіші мініатюрні напівпровідникові та магнітні елементи. На підприємства, де створюються машини, прийшла нова техніка монтажу — техніка «друкованих» схем. Розміри універсальної лічильної машини, складеної з нових елементів з використанням «друкованого» монтажу, невеликі. Вона не набагато більша від звичайного письмового стола. Машина не потребує охолодження, а за надійністю набагато перевищує лампові машини. Спеціалізовані цифрові машини з напівпровідниковими елементами, особливо ті, які встановлюють на літаках, зовсім не великі за розмірами. Одна з таких машин займає стільки ж місця, скільки телевізор, а енергії споживає в 2—3 рази менше від нього.

Наша розповідь про електронні лічильні машини, про їх надзвичайні властивості була коротка. І все ж, прочитавши її, ви, безпереч-

но, відчули найголовніше: застосування електронних машин обіцяє велетенську економію праці мало не в усіх галузях людської діяльності і насамперед там, де створюються матеріальні цінності, — на виробництві. Ми перебуваємо на порозі нової промислової ери: машини не тільки оброблятимуть, виготовлятимуть, машини також і керуватимуть виробництвом.

Ось чому в рішеннях XXI з'їзду Комуністичної партії Радянського Союзу розвитку електронної обчислювальної техніки в нашій країні приділено особливу увагу. Виробництво лічильних і математичних машин розвиватиметься дуже швидкими темпами. На кінець семирічки воно зросте в 4,5—4,7 раза порівняно з 1958 р.

Пленум ЦК КПРС, що відбувся в червні 1959 р. і був присвячений питанням прискорення технічного прогресу, комплексної автоматизації та механізації промисловості і будівництва, поставив завдання переходу від автоматизації окремих операцій до створення повністю автоматизованих цехів і заводів. Це завдання неможливо виконати без найширшого застосування обчислювальних і керуючих машин.



Біля конвейєра немає робітників: всю роботу виконує машина.

ВИСНОВОК

Почавши з розповіді про найпростіші речі (двійкову арифметику, імпульси, імпульсні схеми), ми закінчили яскравими прикладами разючих можливостей машини. Машина бездоганно і швидко лічить, машина перекладає з однієї мови на іншу, машина грає в шахи, машина керує літаком або верстатом. Мало того, машина може імітувати повадки і рефлекси живих істот; за допомогою машини можна вивчати найскладніші процеси в мозку людини; машина, що вирішує логічне завдання, здатна нагромаджувати досвід і навчатися.

Все це, напевне, викличе у вас дуже багато серйозних запитань, найважливішим з яких буде: чи мислить машина? чи може машина працювати зовсім без програми?

Це запитання справді серйозне. Адже якщо це можливо, значить, машина повністю уподібнюється мозку. Але працює вона невимірно швидше і, по суті, безпомилковіше, ніж мозок людини. І чи не доведеться людині поступитися місцем перед машиною, механізмом, створеним руками самої людини?

Такі побоювання даремні. Машина не зможе усунути людину.

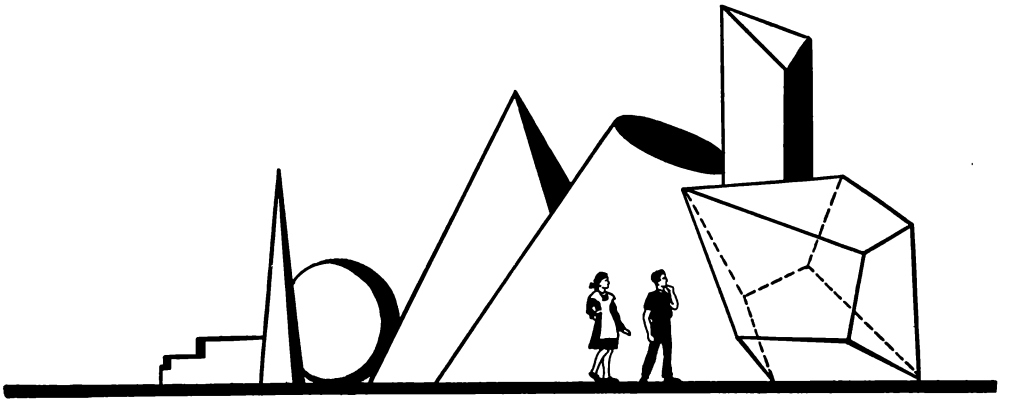
Тепер багато вчених-математиків провадять напружену і копітку роботу по спрощенню програм для лічильних машин, прагнучи до того, щоб машина задовольнялася мінімальним числом вихідних команд, а решту робила б сама. Вчені створили і так звані програмуючі програми. Завдяки їм найбільш трудомістка частина програмування завдань покладається на саму машину. Можливо, з часом вдасться так спростити програми, що 99% всієї «мислячої» роботи виконуватиметься самою машиною. І все ж перші та найважливіші кроки машина завжди виконуватиме з волі людини, за командами, які вона тим чи іншим способом введе в машину.

Як бачимо, машина не мислить. Це не мозок, а апарат, що обробляє відомості, які надсилає в нього людина. Існують й інші

немаловажні відмінності між машиною і мозком. Про все це корисно кожному почитати і подумати.

Отже, машини, які тільки образно можна назвати «думаючими», не загрожують людям.

Людині не доведеться поступатися місцем перед «розумною і безжалісною» машиною. Електронні лічильні машини будуть лише швидкими і надійними помічниками людей в праці, науці, побуті, в будівництві нашого комуністичного завтра.



Фігури і тіла

ГЕОМЕТРІЯ НАВКОЛО НАС

Усі ми звикли до тих предметів, які оточують нас, і часто не помічаємо, скільки різноманітних геометричних фігур міститься навколо. А дехто, можливо, вважає, що різні хитромудрі лінії або поверхні можна зустріти тільки в книгах учених-математиків і ніде більше.

Проте варто уважно роздивитися, і ми відразу виявимо найрізноманітніші геометричні фігури. Виявляється, їх дуже багато. Просто ми цього раніше не помічали.

Ось наша кімната. Всі її стіни, підлога і стеля є площинами (ми не звертатимемо уваги на прорізи вікон та дверей), а сама кімната має форму паралелепіпеда (рис. 1).

Поглянемо на паркетну підлогу. Планки паркета — прямокутники (рис. 2).

Пройдемо в кухню або у ванну кімнату. Плитки підлоги там часто бувають або правильними шестикутниками (рис. 3), або восьмикутниками, між якими укладені невеликі квадратики.

Але повернемося до кімнати і подивимося на меблі. Шафа в своїй основі — паралелепіпед (рис. 4). Письмовий стіл — не що інше, як дуже плоский паралелепіпед, який лежить на двох інших паралелепіпедах — тумбочках, в яких розміщуються ящики (рис. 5). На сто-

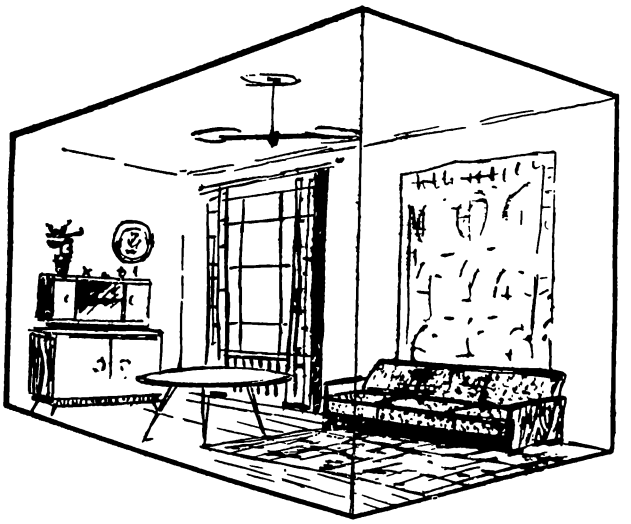


Рис. 1.

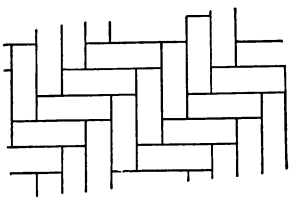


Рис. 2.

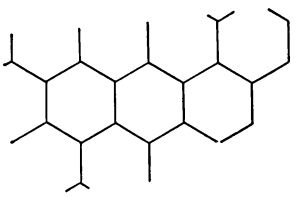


Рис. 3.

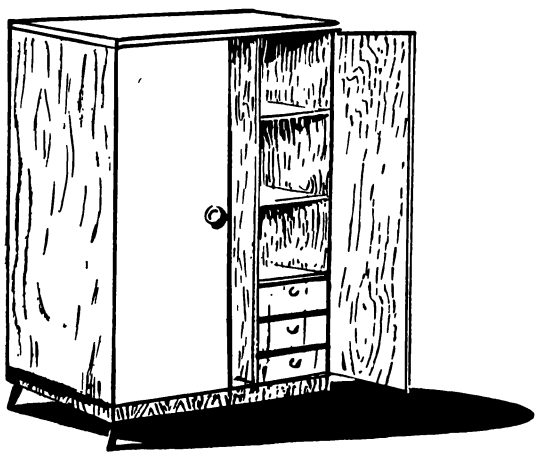


Рис. 4.

лику — лампа з абажуром (рис. 6). Цей абажур — конус.

Відро являє собою зрізаний конус, у якого верхня основа більша від нижньої. А втім, відра бувають і циліндричної форми (рис. 7). Взагалі циліндрів і конусів у будинку дуже багато. Усі прямі труби (водопровід, парове опалення, газопровід) — циліндри. А там, де труби зігнуті, утворюються так звані каналові, або трубчасті, поверхні (рис. 8, *а* і *б*).

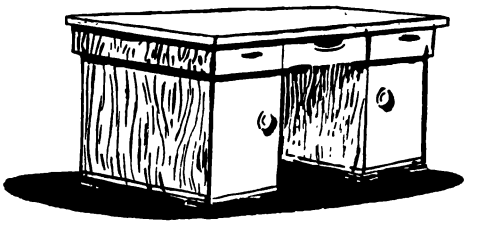


Рис. 5.

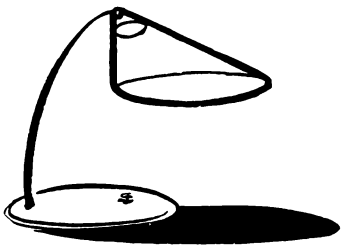


Рис. 6.

У буфеті стоїть чайний посуд. Ось гранчаста склянка з бічною поверхнею правильної многогранної призми (рис. 8, *г*). А ось і блюдечко — знову зрізаний конус (рис. 8, *в*). Тут же лежить лійка. Вона складається з двох зрізаних конусів, які переходять один в один (рис. 8, *д*).

Наллємо у склянку води. Краї її поверхні утворюють форму кола. Нахилимо склянку так, щоб вода не виливалася, і краї водної поверхні стануть елі псом (рис. 8, *е*).

Вийдемо на вулицю. Перед нами — будинки. Якщо не звертати уваги на різні особливості їх архітектурного оздоблення, можна ска-

Рис. 7.

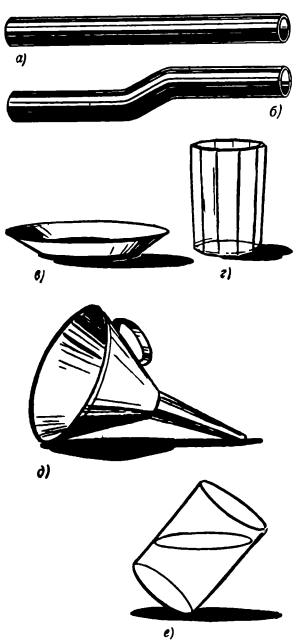


Рис. 8.

зати, що стіни будинків є площинами. Дві стіни, зустрічаючись під кутом, перетинаються по прямій лінії. Будинок у цілому, з цієї точки зору, є тіло, утворене площинами, що перетинаються одна з одною, тобто многогранник. На рис. 9 і 10 зображено два таких будинки-многогранники.

Один з них являє собою паралелепіпед, на якому лежить тригранна призма, другий складається з кількох паралелепіпедів і призм, що переходять одна в одну.

Багато житлових будинків, палаців, громадських будівель прикрашено колонами. Колони здебільшого — циліндри, але можуть мати складнішу форму.

Хто був у Москві, знає, який красивий Московський Кремль. Чудові його вежі! Скільки цікавих геометричних форм покладено в їх основу! Ось, наприклад, Набатна вежа (рис. 11). На високому паралелепіпеді стоїть паралелепіпед трохи менший, з прорізами для вікон, а ще вище споруджена чотирикутна зрізана піраміда. На ній розміщені чотири арки, увінчані в свою чергу восьмикутною

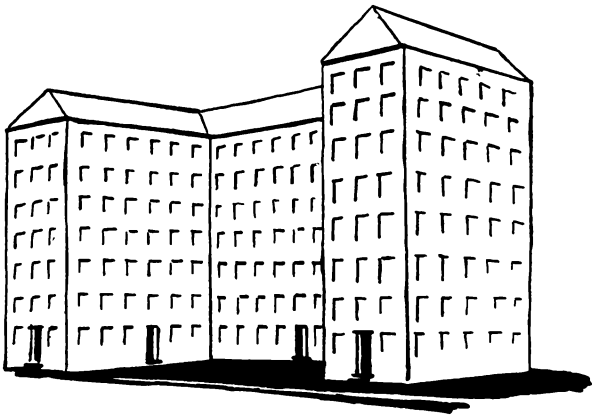


Рис. 10.

пірамідою. На березі Москви-ріки підноситься Беклемішевська вежа. Її основа циліндричної форми переходить у зрізану восьмикутну піраміду і завершується правильною восьмикутною пірамідою.

Вулицею їдуть автомобілі, трамваї, тролейбуси. Їх колеса, з геометричної точки зору, — круги. Ми настільки звикли до цього, що навіть не думаємо про коло як про криву, що допомогла людям у багато разів полегшити свою працю. Але ж був час, коли люди ще не знали колеса, коли вантажі волокли.

Поглянемо на автомобільні фари. Їх внутрішня поверхня дзеркальна. Конструктори ав-

Рис. 9.

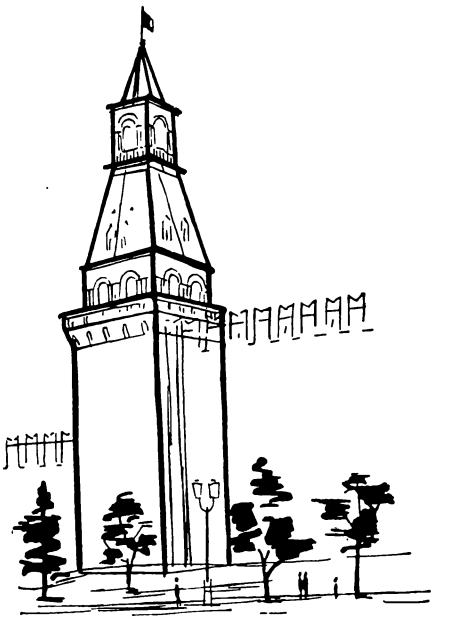


Рис. 11.

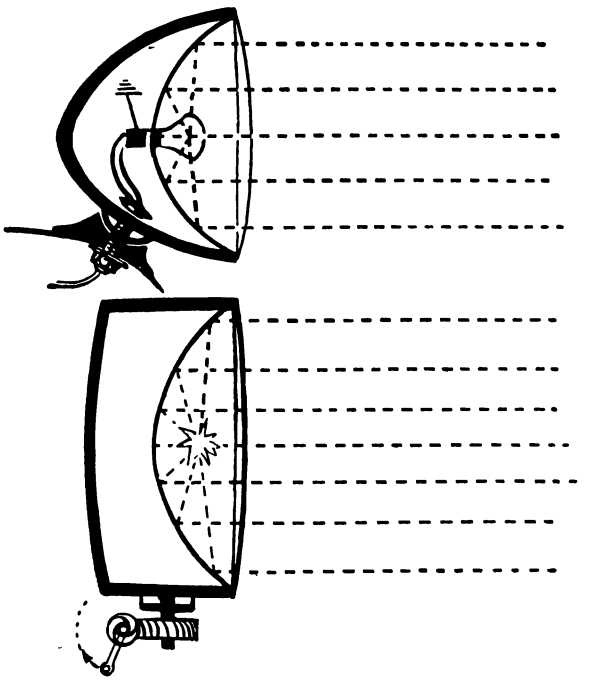


Рис. 12.

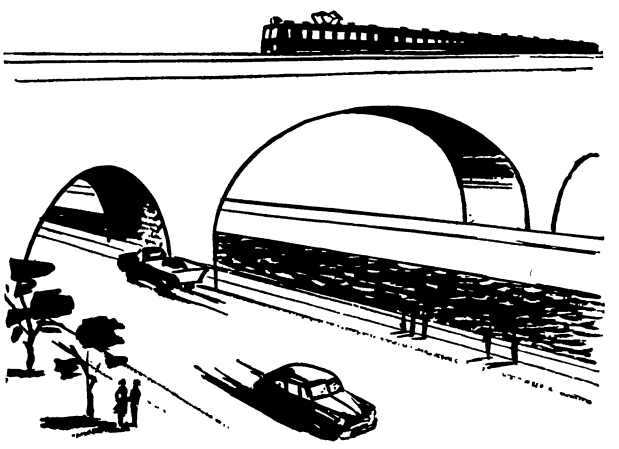


Рис. 13.

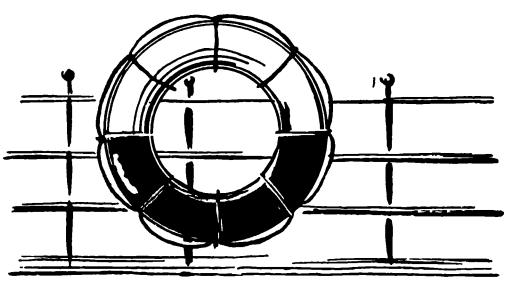


Рис. 14.

томобілів знають, що світло повинно виходити з фар пучком паралельних променів: тоді сила світла буде найслабше зменшуватися із збільшенням відстані. А щоб дзеркало фар відбивало промені паралельним пучком, дзеркалу треба надати форми параболоїда обертання (рис. 12, зверху), всередині якого в певній точці (у фокусі) міститься лампочка. Параболоїд обертання — це поверхня, яка утворюється при обертанні параболи навколо осі.

У деяких марок автомобілів фари містяться всередині капота і зовні видно тільки скло. В інших весь корпус фари виступає назовні і ясно видно, що вона параболічної форми.

Параболоїд обертання служить відбиваючим дзеркалом і у прожекторів (рис. 12, внизу), які надсилають у небо свої потужні промені.

Перед нами міст. Арки мостів бувають різної форми: одні з них еліптичні, інші — параболічні (рис. 13). На парапеті моста часто укріплюють рятувальні круги. Рятувальний круг за формою дуже наближається до тора. Тор — це поверхня, яка утворюється при обертанні кола навколо осі, з якою воно не перетинається (рис. 14). Тор має багато визначних властивостей.

Ми підходимо до радіостанції. Там підносяться радіощогли з випромінювачами електромагнітних коливань на верхівках. Але якої дивної форми ці щогли! Вони складаються з окремих частин (секцій), поставлених одна на одну (рис. 15). А кожна секція подібна до круглої сітки, утвореної прямолінійними стержнями.

Розглянемо першу-ліпшу з секцій (вони відрізняються тільки розмірами). Уявімо

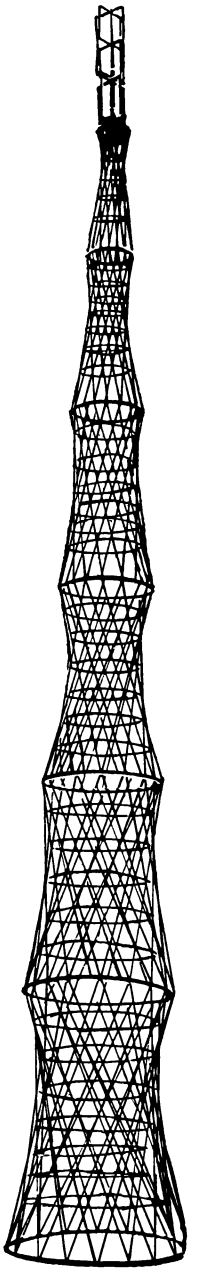


Рис. 15.

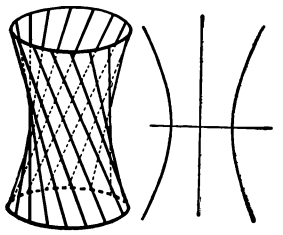


Рис. 16.

собі, що стержні розміщені щільно один до одного. В такому разі вони утворюватимуть визначну криву поверхню, яка називається однопорожнинним гіперболоїдом і складається з прямих ліній. Ті прямолінійні стержні, які ми бачимо, не що інше, як прямолінійні твірні цієї поверхні. Погляньте на однопорожнинний гіперболоїд, зображений на рис. 16. Важко повірити, що він складається з прямих ліній. Однак це саме так. Ця конструкція дуже легка і відзначається надзвичайною міцністю.

Своїй назві однопорожнинний гіперболоїд завдячує гіперболі. Ця поверхня утворена обертанням гіперболи навколо тієї з її осей, яка її не перетинає (рис. 16). В такому випадку при обертанні утворюється єдина поверхня (одна порожнина). Але коли б ми обертали нашу гіперболу навколо другої осі, то дістали б поверхню, що складається з двох частин (порожнин); її називають двопорожнинним гіперболоїдом.

Іноді будують односекційні вишки з прямолінійних металевих стержнів заввишки у багатоповерховий будинок. Так побудовано водонапірну башту біля Сільськогосподарської академії ім. Тімірязєва в Москві. Такі башти були вперше сконструйовані радянським інженером В. Г. Шуховим (1853—1939) і називаються шуховськими баштами.

А тепер сядемо в поїзд. Місто залишилося далеко позаду. Біжать телеграфні стовпи. Але і тут геометрія не покидає нас. Уздовж шляху на стовпах натягнуті проводи. Ось проходить лінія високовольтної передачі. Проводи від власної ваги злегка провисають. Яка ж лінія утворюється при цьому? Таке питання має велике практичне значення. Коли потрібно визначити довжину проводу, необхідного для передачі електроенергії на великі відстані, доводиться враховувати, що його довжина (за рахунок провисання) буде більша, ніж відстань між кінцевими пунктами лінії електропередачі. І щоб точно підрахувати довжину проводів, треба визначити, яка саме лінія утворюється при провисанні проводу між кожними двома стовпами. Виявляється, провід провисає по так званій ланцюговій лінії.

Так само провисає і шнур, укріплений на двох цвяшках, вбитих у стіну. Ланцюгова лінія дуже подібна до параболи, але це не парабола; властивості ланцюгової лінії і параболи різні.

Наш поїзд іде прямолінійною залізничною колією і час від часу плавно проходить закруглення рейок. Плавний рух поїзда на згинах залізничного полотна зумовлений тим, що залізнична колія на закругленнях викривлена не просто по колу, а по деяких досить хитромудрих кривих. Лише іноді, на дуже крутих поворотах, ми відчуваємо, що нас злегка відштовхує до однієї з стінок вагона. Ми знаємо, що в цьому разі на вагони діє відцентрова сила, яка намагається перекинути їх і відхиляє всі тіла, що є в поїзді, до зовнішньої сторони закруглення.

Щоб вагони не перекинулись, зовнішню рейку залізничного полотна на поворотах злегка піднімають порівняно з внутрішньою і цей підйом роблять тим більший, чим крутіший поворот. Але якщо примусити поїзд відразу переходити з прямолінійної дільниці колії на кругову, то треба відразу і круто підняти одну з рейок, і вагони зазнаватимуть при переході різких та сильних поштовхів. Щоб уникнути цього, перехід на закруглення роблять поступовим. Після прямолінійної дільниці колії рейки спочатку укладають по так званій перехідній кривій (уздовж якої викривленість зростає поступово),

Рис. 17.

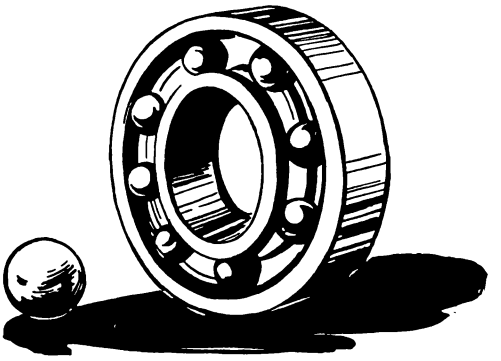


Рис. 18.

і лише потім цю криву переводять у коло. Так само роблять і в кінці повороту. Як перехідні криві використовують різні лінії (залежно від кривизни повороту, швидкості поїзда на повороті і т. д.). Звичайно застосовують або дугу кубічної параболи, або дугу лемніскати, або дугу так званої спіралі Корню.

Досі ми говорили тільки про ті найпростіші лінії і поверхні, які видно з першого погляду, де б ми не були, куди б не пішли. А якщо придивитися уважніше, ми виявлятимемо чимраз нові й нові лінії та поверхні.

Заглянемо на завод. Заводські димарі — приклад зрізаного конуса; широкі знизу, вони поступово звужуються догори (рис. 17). На заводі працюють верстати. Яку силу-силенну найрізноманітніших ліній описують різні рухомі частини верстатів! На будь-якому гвинті є гвинтові нарізки, ми побачимо верстати з еліптичними колесами, зубчасті колеса з дуже різноманітними формами зубців, виточеними по дузі циклоїди, еліпса, евольюти круга. Властивості цих кривих, що мають важливе застосування в техніці, вивчаються вищою математикою.

Здається, ми не згадали ще про кульову поверхню. Але ж і вона зустрічається часто. Пригадаймо хоч би шарикопідшипники (рис. 18). Більш того, форми кулі надають іноді і газгольдерам, тобто резервуарам для зберігання газу. Це пояснюється однією визначною властивістю кульової поверхні: на виготовлення кулі витрачається значно менше матеріалу, ніж на посудину будь-якої іншої форми того ж об'єму.

А скільки ще зустрічається різних поверхонь, складних за формою, що не мають спеціальних назв!

Ось паровий котел, який нагадує циліндр. В ньому є пара під висовим тиском. Тому стінки циліндра злегка (нехай непомітно для ока) прогинаються, утворюючи поверхню дуже складної і неправильної форми, яку, проте, інженери повинні добре знати, щоб зуміти розрахувати котел на міцність. Складну форму має і корпус підводного човна. Він повинен бути добре обтічний, міцний і місткий (рис. 19). Зверніть увагу на форму корабельного корпусу. Від неї залежить і міцність корабля, і його стійкість, і швидкість (рис. 20).

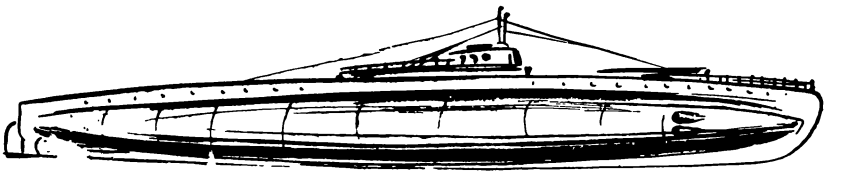


Рис. 19.

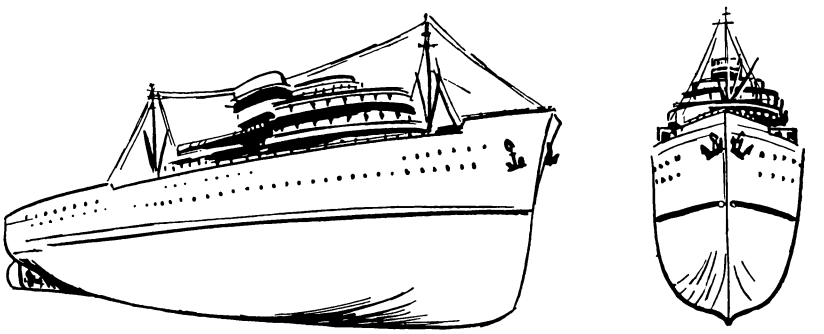


Рис. 20.

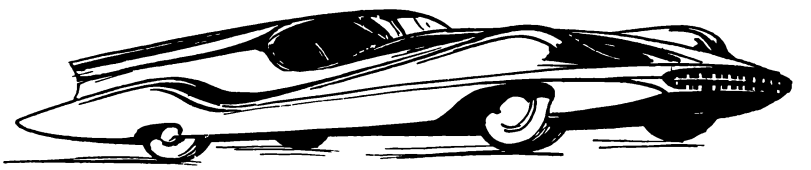


Рис. 21.

Великі швидкості руху примусили інженерів звернути серйозну увагу на форму сучасних поїздів, літаків, автомобілів. Саме від неї залежить зустрічний опір повітря, який швидко зростає із збільшенням швидкості. А якщо форма буде вдала, обтічна, опір повітря можна значно зменшити. Наприклад, гоночний автомобіль. Його кузову надають такої форми, щоб зустрічні потоки повітря плавно обтікали машину (рис. 21).

Мотор автомобіля вміщено в обтічний капот, вітрове скло відхилено назад, дах кузова плавно переходить у похилу задню стінку. І капот, і дах, і задня стінка — не плоскі. Вони являють собою складні поверхні, з якими шкільна математика не має справи. Але ними дуже цікавляться інженери, що старанно їх розраховують у своїх конструкторських бюро.

Отже, ми ознайомилися з багатьма різними лініями, поверхнями і тілами, що нас оточують. Тепер ви й самі, безперечно, побачите силу-силенну таких геометричних форм, про які ми тут не згадували.

А втім, про одну з них, про лінію, яку ніхто не бачить, але яка завжди є біля нас, ми розповімо, бо помітити її самому, нічого не знаючи про неї заздалегідь, неможливо.

Підлога і стеля в нашій кімнаті підтримуються балками, кінці яких вмуровані в стіни. Балки під впливом великого навантаження злегка прогинаються (цей прогин непомітний для ока), і, щоб розрахувати допустиме навантаження на балки, архітектор повинен знати лінію їх прогину. Виявляється, балка, що підтримує підлогу і стелю, прогинається по кривій, яка називається параболою 4-го степеня. Не буде перебільшенням сказати, що ця лінія завжди є у нас під ногами і завжди висить над нашою головою.

Наша стаття підходить до кінця. На закінчення нагадаємо, що всі ми живемо також на своєрідній поверхні, яка, хоч і називається земною кулею, насправді є, як кажуть астрономи, геоїдом і за формою дуже близька до еліпсоїда обертання. Цей еліпсоїд утворений обертанням еліпса навколо його малої осі. Правда, він мало відрізняється від кулі (півосі еліпса, обертанням якого утворений геоїд, відносяться одна до одної, як $\frac{299}{300}$). Але все-таки цю різницю доводиться брати до уваги при складанні географічних карт.

Ми бачимо, скільки найрізноманітніших геометричних ліній і поверхонь використовує людина в своїй діяльності — при будівництві жител, фабрик, заводів, мостів, машин, в сухопутному, морському і повітряному транспорті. Користується ж вона ними не з простої любові до цікавих геометричних фігур, а тому, що властивості цих геометричних ліній і поверхонь дозволяють з найбільшою простотою виконувати різноманітні технічні завдання.

Але щоб застосовувати ці властивості в техніці, треба їх знати. Отже, треба вивчати всі ці лінії і поверхні. І не тільки їх, а й багато інших, бо техніка розвивається і з кожним роком використовує для своїх потреб чимраз нові й нові геометричні форми.

Вивчаючи властивості різних ліній і поверхонь, ми ставимо перед собою мету виразити ці властивості у вигляді формул, щоб вміти за ними робити розрахунки машин, будівель та багатьох інших споруд.

З усього сказаного видно, яку важливу роль в нашому житті відіграє геометрія.

Наша шкільна, елементарна геометрія вивчає лише найпростіші з геометричних фігур. Але є й інші геометричні науки, що вивчають складніші лінії та поверхні.

З деякими питаннями, які розглядають ці розділи геометрії, ви ознайомитеся в наступних статтях.

ЯК ВИНИКЛА ГЕОМЕТРІЯ

Геометрія, як і інші науки, виникла з потреб практики. Саме слово «геометрія» — грецьке, в перекладі означає «землемірство».

Люди дуже рано відчули потребу у вимірюванні земельних ділянок. Вже за 3—4 тис. років до н. е. кожен клапоть родючої землі в долинах Нілу, Тігру та Євфрату, річок Китаю мав значення для життя людей. Після розливу річок, особливо Нілу, доводилося знову ділити землю. Це вимагало певного запасу геометричних та арифметичних знань.

Але ось урожай зібрано. Як у той час відмірювали зерно? Спочатку це робили так, як робимо і ми при вимірюванні води або гасу,

тобто міряли його за об'ємом. Вибирали як одиницю вимірювання посудину певної місткості і лічили, скільки міститься таких посудин у купі зерна. Цей перший спосіб визначення об'єму приводив до питання про співвідношення між об'ємами різних тіл.

Поступово люди почали вимірювати і вивчати властивості складніших геометричних фігур.

З єгипетських папірусів та старовавілонських текстів, що дійшли до нас, видно, що вже за 2 тис. років до н. е. люди вміли визначати площі трикутників, прямокутників, трапецій, наближено обчислювати площу круга. Вони знали також формули для визначення об'ємів куба, циліндра, конуса, піраміди та зрізаної піраміди. Відомості з геометрії незабаром стали необхідні не тільки при вимірюванні землі. Розвиток архітектури, а дещо пізніше і астрономії ставив до геометрії нові вимоги. І в Єгипті, і у Вавілоні споруджувалися величезні храми, будувати які можна було тільки на основі попередніх розрахунків. У VI ст. до н. е. на острові Самос (одна з старогрецьких острівних держав) було побудовано водопровід, по якому вода в місто надходила з джерела, розташованого за горою Кастро. Водопровід проходив через тунель завдовжки 1 *км*. Цікаво, що цей тунель почали копати з обох сторін одночасно і що обидві ділянки його майже точно зійшлися під землею! Це означає, що попереду був визначений напрям тунелю, тобто розв'язана задача обчислювальної геометрії, яка і тепер вважається в інженерній справі аж ніяк не простою. При цьому будівельники далекої давнини повинні були користуватися якимись рисунками, повинні були знати вчення про подібність. На цей час були добре відомі окремі випадки так званої теореми Піфагора, вже знали, що коли взяти трикутники з сторонами a, b і c, де a, b і c — такі цілі числа, що $a^2 + b^2 = c^2$, то ці трикутники будуть прямокутні. В такому вигляді теорема Піфагора і обернені їй твердження були відомі у Вавілоні і в Стародавньому Китаї.

І все ж таки, незважаючи на те, що людство нагромадило такі великі знання геометричних фактів, геометрія як наука ще не існувала.

ВИНИКНЕННЯ ГЕОМЕТРІЇ ЯК НАУКИ

Геометрія стала наукою тільки після того, як у ній почали систематично застосовувати логічні доведення, виводити геометричні твердження не тільки безпосередніми вимірюваннями, а й умовиводами, виведенням одного положення з іншого, і встановлювати їх у загальному вигляді. Це відбулося в Стародавній Греції в VI—IV століттях до н. е. Звичайно цей переворот у геометрії зв'язують з ім'ям ученого та філософа VI ст. до н. е. Піфагора Самоського. Про Піфагора ми не знаємо майже нічого цілком певного. Вже в старовину він став напівлегендарною особою. Проте відомо, що в V ст. до н. е. багато видатних математиків називали себе піфагорійцями. Це дає підставу вважати, що Піфагор був главою першої математичної школи. Саме йому греки приписують створення геометрії як науки.

Подумаємо тепер над питанням: чому логічні доведення відіграють таку істотну роль у геометрії і взагалі в математиці? Справа в тому, що більшість тверджень геометрії є твердженнями, що стосуються безлічі об'єктів. Наприклад, чи можна встановити без доведення, що сума кутів трикутника дорівнює $2d$? Ні, не можна. По-перше, тому, що на практиці ми ніколи не маємо справи з тими трикутниками, які розглядає геометрія. Всі реальні трикутники, нарисовані на папері, не будуть точними трикутниками. Якщо подивитися під мікроскопом на їх сторони, то ми переконаємося, що це не прямі, а нерівні палички з графіту (якщо рисунок зроблено олівцем). Ідеальний математичний трикутник ніколи не можна відтворити на практиці. Це — абстрактний математичний образ, який об'єднує в собі деякі основні властивості реальних трикутників. По-друге, коли б ми навіть і могли вимірювати ідеальні трикутники, то й тоді неможливо було б перекона-

тися в справедливості висловленої теореми, бо різних трикутників надзвичайно багато, а нам довелося б перебрати їх усі! Нарешті, навіть для одного трикутника ми не могли б встановити цю теорему, бо кути завжди вимірюються з деяким певним ступенем точності, так що ми могли б тільки переконатися, що сума кутів трикутника лише приблизно дорівнює 180°, скажімо, відрізняється від 180° не більше, ніж на 0°1′ або 0°0′1″.

Торжеством нового методу було відкриття того, що не всі відрізки мають спільну міру, що існують несумірні відрізки. Це відкриття вчені ніколи не змогли б зробити, виходячи з безпосередньої практики вимірювань: адже такі вимірювання завжди виконуються з певним ступенем точності, і тому в межах цієї точності всі відрізки сумірні. Очевидно, несумірними відрізками, відкритими вперше, були сторона і діагональ квадрата. Найстародавніше доведення дійшло до нас; воно проводиться методом від супротивного і спирається на теорему Піфагора та на одне твердження теорії чисел. Ось це доведення (рис. 1): нехай сторона і діагональ квадрата сумірні, тобто є такий відрізок f, який укладається ціле число разів і на стороні, і на діагоналі квадрата: $AC = Pf$, $AB = Qf$ і $\frac{AC}{AB} = \frac{Pf}{Qf} = \frac{p}{q}$, де $\frac{p}{q}$ — нескоротний дріб. Тоді $\frac{AC^2}{AB^2} = \frac{p^2}{q^2}$. Але за теоремою Піфагора $AC^2 = 2AB^2$, тобто $p^2 = 2q^2$.

Отже, p^2 — парне число. Звідси за відомою стародавнім математикам арифметичною теоремою виходило, що і p — парне: $p = 2t$. Тоді $4t^2 = p^2 = 2q^2$ і $q^2 = 2t^2$, тобто і q—парне. Приходимо до суперечності з твердженням про те, що $\frac{p}{q}$ — нескоротний дріб.

Відкриття несумірності справило надзвичайне враження на вчених стародавності. До цього вся метрична геометрія і теорія подібності спиралась на арифметику раціональних чисел. Люди вважали, що раціональних чисел цілком досить для того, щоб виміряти будь-яку величину. І раптом виявилося, що це не так: хоч би який маленький відрізок ми вибрали, він не зможе вміститися ціле число разів і на стороні, і на діагоналі квадрата. Арістотель — видатний філософ стародавності — говорив, що наука виникла від здивування, наприклад, від здивування з приводу того, що діагональ і сторона квадрата несумірні. Другий видатний грецький філософ — Платон — писав, що до того, як він дізнався про існування несумірних відрізків, він був подібний до нерозумної тварини.

Важко розповісти в небагатьох словах, який вплив мало це відкриття на розвиток математики. Його можна, мабуть, порівняти тільки із значенням, яке мало відкриття неевклідової геометрії для розвитку науки XIX—XX століть. Безпосередні наслідки цього відкриття були такі:

1) Стародавні греки переконалися в тому, що багато відрізків, наприклад діагональ і сторону квадрата або гіпотенузу і сторону прямокутного трикутника з сторонами 1 і 2, не можна виразити раціональними числами, зате можна побудувати з допомогою циркуля та лінійки. Тому вони в своїх теоретичних дослідженнях перейшли від обчислення до побудов. Алгебраїчні тотожності і рівняння вони записували не з допомогою букв, як це ми тепер робимо в алгебрі, а з допомогою співвідношень між геометричними фігурами. Наприклад, тотожність $(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$ записувалась так, як це зображено на рис. 2.

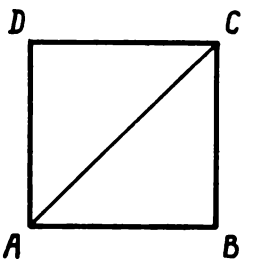


Рис. 1.

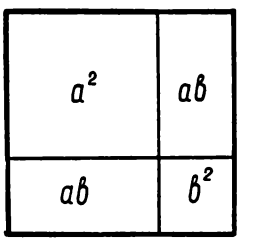


Рис. 2.

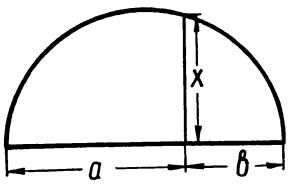


Рис. 3.

Рівняння $x^2 = ab$ мовою геометрії формулювалося так: перетворити даний прямокутник з сторонами a і b у квадрат. Сторону квадрата x, як відомо, можна знайти геометрично з допомогою циркуля та лінійки. Як це робиться, видно з рис. 3. Таким чином, геометрія стала мовою математики того часу. І алгебру, і навіть арифметику викладали з її допомогою. Це, звичайно, дуже сприяло розвиткові і самої геометрії.

2) Грецькі вчені поставили і розв'язали проблему визначення відношення величин навіть тоді, коли ці величини несумірні. Щоб дати уявлення, наскільки глибока була ця теорія, скажемо тільки, що в новий час аналогічні теорії були побудовані лише наприкінці минулого століття.

Усі ці нові проблеми і створені у зв'язку з ними теорії привели до того, що удосконалювалися самі способи математичних доведень, зростала потреба в створенні стрункої логічної системи в геометрії.

ПОБУДОВА ДЕДУКТИВНОЇ СИСТЕМИ

Але як будувати таку систему? Адже кожне окреме твердження ми доводимо, спираючись на деякі інші твердження. Ці твердження в свою чергу доводимо посиланням на якісь-то треті твердження і т. д. Ці посилання ми могли б продовжувати без кінця, і процес доведення ніколи б не завершився. Як же бути? Цю обставину помітили ще в далекій давнині, і тоді ж був знайдений вихід. Не пізніше IV ст. до н. е. грецькі математики при побудові геометрії вибирали деякі твердження, які приймалися без доведення, а всі інші твердження виводили з них строго логічно. Твердження, прийняті без доведення, називалися а к с і о м а м и і п о с т у л а т а м и.

Найдосконалішим зразком такої теорії протягом понад 2 тис. років були «Начала» Евкліда, написані близько 300 р. до н. е.

Як постулати Евклід вибрав такі твердження, в яких встановлювалося те, що можна перевірити найпростішими побудовами за допомогою циркуля і лінійки, наприклад: 1) через дві точки завжди можна провести пряму лінію (це можна зробити з допомогою лінійки), 2) з даної точки даним радіусом можна описати коло (це можна зробити з допомогою циркуля). Евклід прийняв також деякі загальні твердження-аксіоми, наприклад, що дві величини, нарізно рівні третій, рівні між собою. Вони були названі аксіомами.

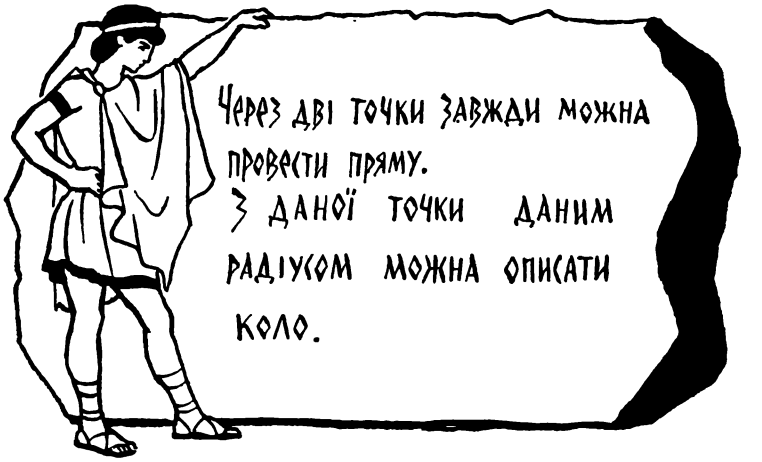
На підставі своїх постулатів та аксіом Евклід строго і систематично розвинув всю планіметрію, а з її допомогою побудував елементи алгебри та вчення про квадратні рівняння. В його творі є також загальна теорія відношень, яка застосовується у вченні про подібність, теорія чисел, метод визначення площ та об'ємів і основи стереометрії. Вінчає «Начала» вчення про правильні многогранники, тобто такі, у яких всі грані є рівними між собою правильними многокутниками. Евклід довів, що існують п'ять правильних многогранників: тетраедр, куб, октаедр, додекаедр та ікосаедр — і ніяких інших правильних многогранників бути не може.

Можна сказати, що Евклід у своїх «Началах» заклав основи не тільки геометрії, а й усієї античної математики.

На новий, вищий щабель дослідження основ геометрії вчені піднялися тільки в XIX ст. Тоді було з'ясовано, що Евклід дав перелік не всіх аксіом, які насправді потрібні для побудови геометрії. У дійсності при доведеннях він ними користувався, хоч і не формулював їх. Проте все це аж ніяк не применшує ролі Евкліда, який перший показав, як можна і як потрібно будувати математичну теорію. Створений ним дедуктивний метод міцно увійшов у математику. В цьому розумінні

всі наступні математики, аж до наших сучасників, є учнями Евкліда.

Геніальний російський учений Микола Іванович Лобачевський (1792 — 1856) побудував нову систему геометрії, в основі якої лежить постулат про паралельність, протилежний V постулатові Евкліда. Якщо в геометрії Евкліда через точку поза прямою в площині, що визначається цією точкою і цією прямою, можна провести тільки одну пряму, що не перетинає даної, то в геометрії Лобачевського можна провести безліч таких прямих. Система геометрії Лобачевського виявилась такою ж несуперечливою, як і Евклідова. Згодом видатний німецький математик Бернгард Ріман знайшов загальний метод побудови таких неевклідових геометрій, в яких можна вимірювати довжини, площі, кути та інші геометричні величини. З допомогою нових геометрій вдалося описати фізичні явища, які були незрозумілі з точки зору геометрії Евкліда та фізики Ньютона. Докладніше про це ви зможете дізнатися з статті «Про різні геометрії».

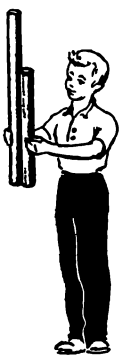


ВИМІРЮВАННЯ ДОВЖИН, ПЛОЩ І ОБ'ЄМІВ

ВИМІРЮВАННЯ ДОВЖИН

Уявімо, що нам треба визначити, який з двох предметів (наприклад, двох прямих металевих стержнів) довший. Для цього їх порівнюють, тобто прикладають один до одного, і дістають потрібну відповідь.

Зрозуміло, що далеко не всякі два предмети можна порівнювати за довжиною таким способом. Якщо, наприклад, треба визначити, який з двох мостів довший, то згаданий спосіб порівняння буде вже непридатний. У таких випадках вдаються до так званого процесу вимірювання. При вимірюванні предметів кожному з них ставлять у відповідність деяке число, яке називається довжиною предмета. Після цього довшим вважають той предмет, для якого при вимірюванні одержали більше число.

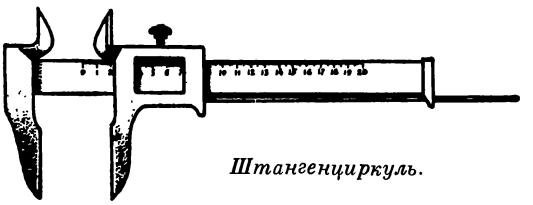


Який стержень довший?

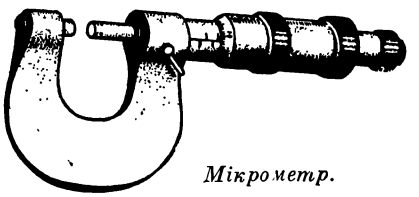
Звичайно вимірювання здійснюють так: до вимірюваного стержня прикладають лінійку з поділками, відстані між якими дорівнюють довжині еталона, наприклад 1 *см*, або його частинам. Потім позначають, що у стержні укладалося a_0 цілих сантиметрів і a_1 десятих частин сантиметра *(мм)*. Якщо виміряти хочуть точніше, то, застосовуючи, наприклад, штангенциркуль або мікрометр, виявляють, що у відрізку укладалося a_2 сотих, a_3 тисячних частин сантиметра і т. д.

У будь-якому випадку в результаті такого вимірювання ми дістаємо деякий скінченний десятковий дріб $a_0 + \frac{a_1}{10} + \frac{a_2}{10^2} + \ldots + \frac{a_n}{10^n}$. Це число і приймаємо за довжину стержня. Збільшення точності вимірювання може привести до того, що у цього дробу збільшиться кількість цифр, але він буде завжди скінченний.

Однак безпосереднє вимірювання предметів буває важким і дуже часто абсолютно неможливим. Наприклад, як визначити відстань між небесними тілами? Для цього треба створити спеціальні геометричні методи, які дозволили б замінити безпосереднє вимірювання обчисленнями за формулами.



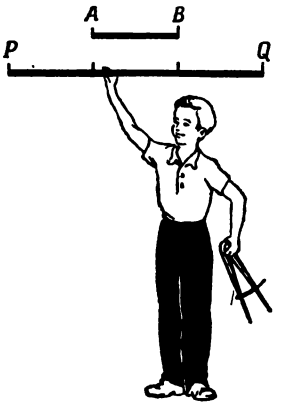
Штангенциркуль.



Мікрометр.

Геометрія вивчає абстрактні поняття: точки, прямі, площини (див. статтю «Про різні геометрії»), тоді як у реальному світі зустрічаються лише конкретні предмети. При вимірюванні конкретного предмета процес неодмінно обірветься, хоч би з якою точністю ми його не проводили.

Якщо ж ми вимірюватимемо геометричний відрізок AB з допомогою іншого геометричного відрізка PQ, який приймемо за еталон, може статися, що процес вимірювання триватиме необмежено. Тоді в результаті вимірювання дістанемо нескінченний десятковий дріб. Це матиме місце, якщо, наприклад, вимірюваний відрізок AB становить $\frac{1}{3}$ відрізка PQ. Для вимірювання відрізка AB ділимо відрізок PQ на десяті частини, потім на соті і т. д. Тоді в процесі вимірювання дістанемо нескінченний періодичний дріб 0,333...



Може статися, що вимірювання дасть нескінченний неперіодичний дріб. В шкільному курсі, наприклад, доводять, що коли AC — діагональ квадрата, а BC — його сторона, то в результаті вимірювання AC за допомогою BC дістаємо нескінченний неперіодичний десятковий дріб 1,4142135..., який являє собою ірраціональне число $\sqrt{2}$. Кожному восьмикласникові добре відомо, як знаходити десяткові знаки цього числа.

$AB = PQ \cdot 0{,}333\ldots$

Отже, в геометрії в результаті процесу вимірювання кожному відрізкові AB ставиться у відповідність деяке (раціональне або ірраціональне) число, яке ми позначатимемо $l(AB)$. Це число називається д о в ж и н о ю відрізка.

Які ж властивості має довжина відрізка? Перелічимо чотири основні властивості.

1°. Очевидно, довжина відрізка є число додатне:

$$l(AB) > 0.$$

2°. Якщо відрізки A_1B_1 і A_2B_2 рівні, тобто збігаються при накладанні, то їх довжини (числа, знайдені при їх вимірюванні) також рівні:

$$l(A_1B_1) = l(A_2B_2).$$

3°. Якщо точка C лежить на відрізку AB, то число, знайдене в результаті вимірювання AB, дорівнює сумі чисел, знайдених при вимірюванні відрізків AC і CB, тобто

$$l(AB) = l(AC) + l(CB).$$

Ця властивість довжини на перший погляд здається очевидною: адже відрізок AB складається з відрізків AC і CB. Насправді ж тут не все так просто. Дійсно, треба перевірити, що коли, наприклад, при вимірюванні AC виходить нескінченний дріб $\sqrt{2} = 1{,}4142135\ldots$, а при вимірюванні CB — другий нескінченний дріб $\sqrt{3} = 1{,}7320508\ldots$ і ми складемо ці відрізки разом в один відрізок AB та будемо його вимірювати тим же еталоном, то дістанемо нескінченний дріб $\sqrt{2} + \sqrt{3} = 3{,}146264\ldots$ Якщо добре вдуматися, то стане зрозуміло, що тут далеко не очевидно, якими будуть десяткові знаки числа, знайденого при вимірюванні відрізка AB.

Отже, властивість 3° потребує перевірки. Доведення того, що вона справді має місце, подається в багатьох докладних посібниках з геометрії.

4°. Очевидно, що в результаті вимірювання еталонного відрізка PQ дістаємо одиницю: $l(PQ) = 1$.

Отже, в результаті вимірювання кожному відрізкові ставиться у відповідність число-довжина, що має властивості 1°—4°.

Число $l(AB)$ щоразу являє собою скінченний або нескінченний десятковий дріб, який можна записати так:

$$l(AB) = a_0 + \frac{a_1}{10} + \frac{a_2}{10^2} + \frac{a_3}{10^3} + \ldots$$

Уявімо собі тепер, що при вимірюванні від-

різка AB ми відрізок PQ розбиваємо не на 10 частин, а на 7, потім кожну з одержаних частин знову розбиваємо на 7 частин і т. д.

Тоді в процесі вимірювання дістанемо якесь число

$$\lambda(AB) = b_0 + \frac{b_1}{7} + \frac{b_2}{7^2} + \frac{b_3}{7^3} + \dots$$

Постає питання, чи рівні числа, знайдені при різних способах вимірювання відрізка AB,— інакше кажучи, чи рівні $l(AB)$ і $\lambda(AB)$. Можна довести, що в обох випадках ці числа рівні, тобто результат вимірювання не залежить від того, яким способом воно здійснюється. Це доведення спирається лише на той факт, що як число $l(AB)$, так і число $\lambda(AB)$ мають властивості 1°—4°.

Властивості 1°—4° однозначно визначають довжини всіх відрізків. Ці властивості є тими мінімальними вимогами, виконання яких дозволяє повністю знайти довжини всіх відрізків.

Їх ми і приймемо як аксіоми для побудови теорії вимірювання довжин.

ВИМІРЮВАННЯ ПЛОЩ

Тепер уявімо собі, що треба порівняти між собою два куски жерсті довільної форми. Як і відрізки, їх можна накласти один на один. Якщо при цьому перший цілком укладеться в другому, то вважають, що другий кусок більший. Але така відповідь, та й спосіб її одержання навряд чи можуть нас задовольнити. По-перше, може статися, що жоден з цих кусків не вкладеться цілком у другому. По-друге, сама відповідь (більший чи менший) ще мало про що говорить, для практики треба ще знати — на скільки. По-третє, взагалі не всякі два предмети можна переносити з місця на місце. Справді, як порівняти між собою дві земельні ділянки?

Треба кожній ділянці поставити у відповідність деяке число, що називається п л о щ е ю ділянки, яке характеризувало б її розмір. Зрозуміло, що процес вимірювання ділянок повинен бути значно складнішим від процесу вимірювання відрізків, бо вони можуть мати найрізноманітнішу форму. Відразу ж виникає необхідність у побудові геометричної теорії, яка давала б можливість відповісти на багато найважливіших практичних питань.

Перейдемо тепер до викладу того, як у геометрії можна розв'язати задачу про вимірювання площ.

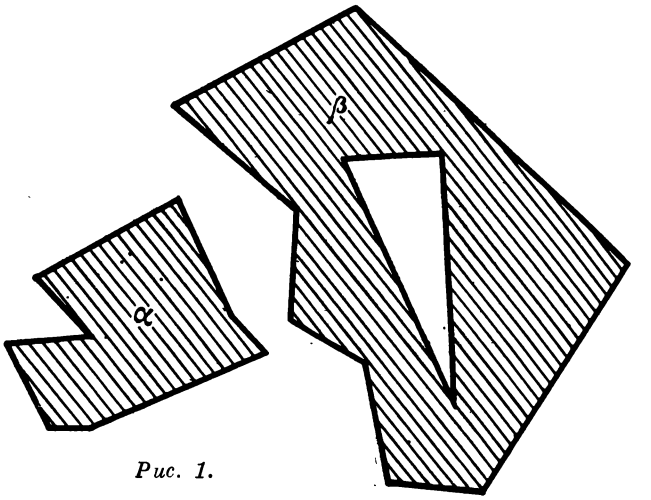


Рис. 1.

Розглянемо на площині різноманітні ділянки, обмежені однією або кількома ламаними лініями з скінченним числом ланок. Такі ділянки — ми їх називатимемо далі многокутниками — зображені на рис. 1.

Завдання полягає в тому, щоб для всіх таких многокутників знайти числові характеристики, що називаються площами цих многокутників. Самі многокутники позначатимемо грецькими буквами α, β, . . . , а їх площі $S(\alpha)$, $S(\beta)$, . . . Які ж властивості повинно мати число S, щоб його можна було природно вважати площею? Ці бажані властивості можна почерпнути з великого практичного досвіду.

1°. Площа кожного многокутника повинна бути додатним числом:

$$S(\alpha) > 0.$$

2°. Якщо многокутники α і β при накладанні збігаються, то їх площі повинні бути рівні:

$$S(\alpha) = S(\beta).$$

3°. Якщо многокутник α розбито на два многокутники β і γ, то

$$S(\alpha) = S(\beta) + S(\gamma).$$

4°. Площа деякого еталонного многокутника (наприклад квадрата ω з стороною 1) дорівнює одиниці:

$$S(\omega) = 1.$$

Тепер поставимо два запитання:

I. Чи розв'язна задача на вимірювання площ многокутників?

Інакше кажучи, чи можна вказати безпосередній спосіб, за допомогою якого кожному

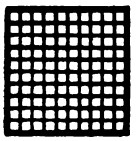


Рис. 2.

многокутнику можна було б поставити у відповідність число, що має властивості 1°—4°?

II. Чи єдиним способом розв'язна задача на вимірювання? Інакше кажучи, чи будуть площі многокутників однозначно визначатися властивостями 1°—4°?

Можна довести, що обидва ці питання вирішуються позитивно. Не подаючи доведення, вкажемо тільки на деякі принципіальні труднощі, зв'язані з його проведенням. Тут, як і при вимірюванні відрізків, треба сконструювати деякий вимірювальний процес, що дозволяє для кожного многокутника α знайти число $S(\alpha)$ так, щоб здійснювалися властивості 1°—4°. Зробити це можна різними способами. Опишемо коротко один з можливих вимірювальних процесів.

Розглянемо спочатку квадрат ω, сторона якого дорівнює 1. Розіб'ємо тепер кожну сторону квадрата на 10 рівних частин, проведемо через точки поділу прямі, паралельні сторонам квадрата (рис. 2). Квадрат ω, очевидно, розіб'ється на $10^2 = 100$ маленьких рівних квадратиків з стороною $\frac{1}{10}$. Позначимо кожен з них через ω_1. Площі їх (якщо тільки площа має властивість 2°) повинні бути рівні. Внаслідок властивості 3° сума всіх площ квадратиків ω_1 повинна дорівнювати площі квадрата ω, яка за властивістю 4° дорівнює 1. Отже, $10^2 S(\omega_1) = S(\omega) = 1$. Звідси

$$S(\omega_1) = \frac{1}{10^2}.$$

Якщо, діючи аналогічно, розбити квадратик ω_1 на 100 квадратиків ω_2, то легко бачити, що площа $S(\omega_2) = \frac{1}{100^2}$. Розбиваючи квадратик ω_2 на 100 квадратиків ω_3, знайдемо, що $S(\omega_3) = \frac{1}{1000^3}$, і т. д.

Розглянемо тепер прямокутник α (рис. 3), одна сторона якого $a = 2{,}3$, а друга $b = 3{,}4$. З рис. 3 легко зробити висновок, що прямокутник α розбивається на 6 квадратиків ω і 182 квадратики ω_1. На підставі властивостей 2°, 3°, 4° і встановленого співвідношення між площами $S(\omega)$ і $S(\omega_1)$ маємо:

$$S(\alpha) = 6S(\omega) + 182S(\omega_1) = 6 \cdot 1 + 182 \times \times \frac{1}{10^2} = 7{,}82 = ab.$$

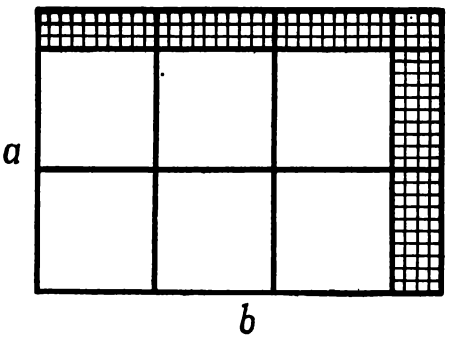


Рис. 3.

Аналогічно можна показати, що і в загальному випадку площа прямокутника $S(\alpha)$ дорівнює добуткові ab довжин його суміжних сторін, бо площа має властивості 1°—4°. Доведення тут значно ускладнюється в тому разі, коли хоч би одне з чисел a, b виражається нескінченним десятковим дробом.

Позначимо тепер через Δ довільний трикутник ABC (рис. 4). Нехай $BC = a$ — його найбільша сторона, а h_a — висота, опущена на цю сторону. Тоді, проводячи середню лінію KL і опускаючи на неї перпендикуляри AD, BM і CN, встановимо, що трикутники, позначені однаковими грецькими буквами (β і γ), рівні. Через те що трикутник Δ і прямокутник $BCNM$ складаються з рівних частин (двох трикутників β та γ і трапеції $BKLC$), то, користуючись властивостями 2° — 3°, легко знайдемо:

$$S(\Delta) = S(\beta) + S(\gamma) + S(BKLC) = S(BCNM).$$

Площа ж прямокутника $BCNM$ дорівнює, очевидно, $\frac{1}{2} ah_a$. Таким чином, ми довели, що площа трикутника $S(\Delta)$ дорівнює $\frac{1}{2} ah_a$.

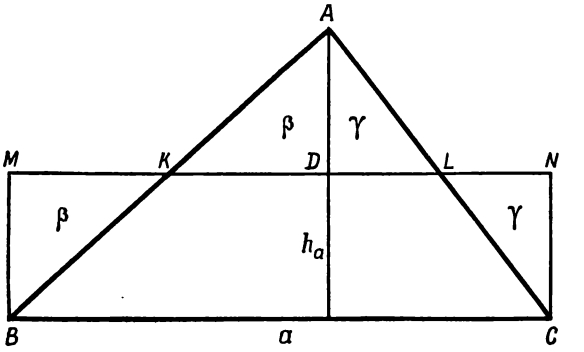


Рис. 4.

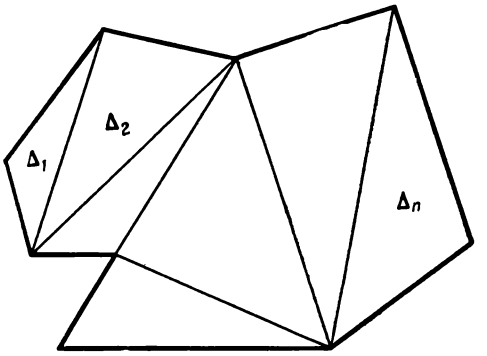


Рис. 5.

Однак тут треба довести (і це робиться легко), що $ah_a = bh_b = ch_c$, тобто що $S(\Delta)$ не залежить від вибору як основи будь-якої сторони трикутника.

Розглянемо далі многокутник α. Якимнебудь способом (див., наприклад, рис. 5) його можна розбити на скінченне число трикутників $\Delta_1, \Delta_2, \ldots, \Delta_n$. Після цього, бажаючи додержати умови 3°, вважатимемо, що площа $S(\alpha)$ многокутника α дорівнює сумі площ трикутників $\Delta_1, \Delta_2, \ldots, \Delta_n$:

$$S(\alpha) = S(\Delta_1) + S(\Delta_2) + \ldots + S(\Delta_n).$$

На цьому і закінчується процес вимірювання площі многокутника. Називатимемо цей процес т р і а н г у л я ц і є ю. Але тут є одна тонкість: треба відразу ж довести, що при різних розбиваннях многокутника α на трикутники, тобто при різних тріангуляціях, завжди діставатимемо одне й те ж число $S(\alpha)$. Інакше кажучи, треба довести, що числовий результат вказаного вимірювання многокутника α не залежить від самого способу цього вимірювання.

Далі треба довести, що числа $S(\alpha)$, знайдені внаслідок такого процесу, задовольняють всі чотири умови 1°—4°. Цим завершується доведення розв'язності задачі на вимірювання площ (запитання I).

Нарешті, останнє. Ми описали деякий вимірювальний процес, що полягає у розбиванні многокутника на трикутники. Вкажемо тепер на інший вимірювальний процес, зовнішнім виглядом абсолютно відмінний від описаного вище, який також дає можливість всім многокутникам α поставити у відповідність числа $\sigma(\alpha)$, що мають властивості 1°—4°. Називатимемо цей процес к в а д р у в а н н я м.

Для цього вкриємо многокутник α, зображений на рис. 6, квадратною сіткою, що складається з квадратів ω. Кожен з квадратів ω розіб'ємо на 10^2 квадратиків ω_1. Кожен квадратик ω_1 розіб'ємо на 10^2 квадратиків ω_2 і т. д.

Підрахуємо, скільки квадратів ω цілком уклалося в многокутнику α. Нехай їх буде k штук (на рис. 6 $k=5$). При цьому залишиться частина многокутника α, в якій не укладаються цілі квадрати ω. Підрахуємо, скільки квадратиків ω_1 цілком уклалося на площі, що залишилася. Нехай їх буде k_1 штук.

У частині многокутника α, яка знову залишилася, укладеться k_2 штук квадратиків ω_2 і т. д. Через те що $S(\omega) = 1$; $S(\omega_1) = \frac{1}{10^2}$; $S(\omega_2) = \frac{1}{100^2}$; ... , то для задоволення властивостей 1°—4° природно вважати, що площа всього многокутника α повинна дорівнювати

$$\sigma(\alpha) = k + \frac{k_1}{10^2} + \frac{k_2}{100^2} + \frac{k_3}{1000^2} + \ldots \qquad (1)$$

Це підсумовування буде, взагалі кажучи, нескінченним, але сума ніколи не зможе перевищити те число квадратів ω, якими можна з надлишком покрити весь многокутник α (на рис. 6 многокутник α цілком вкривається 20 квадратами ω).

Прямокутник, зображений на рис. 3, був вкритий саме такою сіткою. Там $k = 6$, $k_1 = 182$, $k_2 = k_3 = \ldots = 0$ і лінії сітки паралельні сторонам прямокутника. Коли б прямокутник на рис. 3 вкрити тією ж сіткою, попереду повернувши її на деякий кут, то

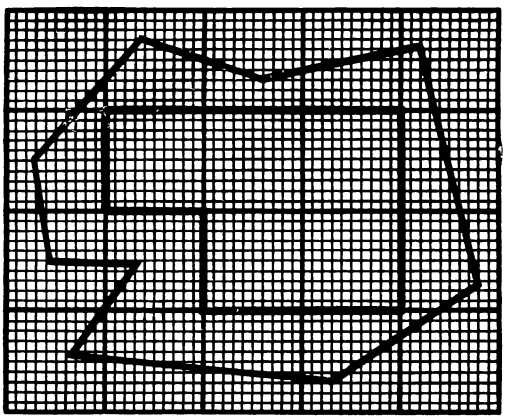


Рис. 6.

числа k, k_1, k_2, ... були б іншими. Виникає запитання: чи й у випадку повернутої сітки для прямокутника сума (1) все-таки дорівнюватиме $ab = 7{,}82$?

Взагалі, чи залежить результат квадрування від положення сітки? Можна довести (це досить складна справа), що при будь-якому розміщенні сітки величина $\sigma(\alpha)$ суми (1) буде одна й та сама, тобто результат квадрування не залежить від положення сітки.

Отже, і процес тріангуляції завжди ставить у відповідність многокутнику α деяке число $S(\alpha)$, яке не залежить від способу тріангуляції, і процес квадрування ставить у відповідність тому ж многокутнику число $\sigma(\alpha)$, яке також не залежить від способу квадрування. Як числа S, так і числа σ задовольняють властивості 1°—4°.

Постає запитання: чи збігаються між собою числа $S(\alpha)$ і $\sigma(\alpha)$, тобто чи збігаються між собою результати квадрування і тріангуляції? Можна довести, що $S(\alpha) = \sigma(\alpha)$ для кожного многокутника α. Більше того, всякий інший процес вимірювання, що задовольняє умови 1°—4°, дасть той самий числовий результат для кожного многокутника, що й процеси, описані вище. Цим завершується відповідь на друге запитання.

Зауважимо, що доведення висловлених тверджень не зовсім прості. Читачеві може здатися, що всі ці твердження і так очевидні і їх взагалі не треба доводити: вони багато разів підтверджувалися на практиці.

З цього приводу можна зауважити ось що. Ми тут будуємо геометричну теорію вимірювання, вважаючи заданими лише основні властивості 1°—4° площ як аксіоми для побудови теорії площ. (Нагадаємо, що вони цілком аналогічні до властивостей-аксіом 1°—4° довжин!).

Самі аксіоми взяті з великого практичного досвіду. Висновки строгої теорії, побудованої на цих аксіомах, знаходять у свою чергу найважливіші практичні застосування.

Крім того, практична перевірка тверджень, які часом здаються абсолютно очевидними, часто просто нездійсненна. І може статися, що при збільшенні точності вимірювань положення, які раніше здавалися очевидними, будуть просто невірними.

Вкажемо ще на одну дуже цікаву і важливу теорему, яку вперше довели незалежно один від одного угорський математик Бойай та німецький учений Гервін; вона стосується вимірювання площ многокутників.

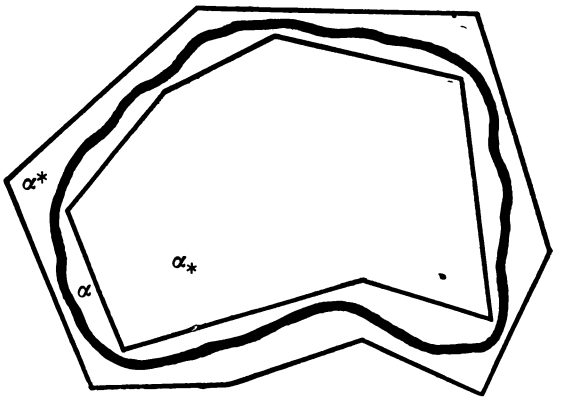


Рис. 7.

Якщо два многокутники α і β мають однакову площу, тобто $S(\alpha) = S(\beta)$, то многокутник α можна розрізати на скінченне число многокутників α_1, α_2, ... , α_n, з яких можна скласти другий многокутник β [1].

Так, наприклад, на рис. 4 трикутник ABC розрізано на частини, з яких складено прямокутник $BCNM$.

На закінчення спинимося коротко на вимірюванні площ фігур, обмежених кривими лініями. Зауважимо відразу, що це питання слід вирішувати не для якої-небудь однієї фігури (наприклад круга), а для цілого класу фігур подібно до того, як це робилося вище для широкого класу многокутників. Це пояснюється тим, що поняття площі не безпредметне — воно викликано необхідністю знайти чисельну характеристику для порівняння однієї з одною різних фігур з деякого певного класу.

Розглянемо фігуру α, обмежену кривою лінією (рис. 7). Многокутник α_*, який цілком міститься всередині фігури α, назвемо вкладеним, а многокутник α^*, що містить всередині себе фігуру α, назвемо обвідним.

Умовимося називати фігуру α квадровною, якщо для неї можна так підібрати вкладений і обвідний многокутники α_* і α^*, щоб їх площі відрізнялися між собою як завгодно мало, тобто щоб різниця $S(\alpha^*) - S(\alpha_*)$ була як завгодно мала [2].

Якщо α — многокутник, то як α_* і α^* можна взяти самий многокутник α. Тоді

[1] Доведення цієї теореми можна знайти в невеликій, але дуже змістовній книжці: В. Г. Болтянский, Равновеликие и равносоставленные фигуры.

[2] Що таке площа многокутника, ми вже знаємо.

$S(\alpha^*) - S(\alpha_*) = 0$, і, отже, кожний многокутник квадровний. Можна довести, що всі фігури, які зустрічаються в прикладних питаннях техніки, квадровні.

У шкільному курсі, наприклад, подається доведення, що круг є квадровною фігурою. Там як вкладені взяті вписані, а як обвідні — описані правильні многокутники.

Неважко зрозуміти, що фігуру, обмежену кривими лініями, не можна розбити на скінченне число трикутників і, отже, процес тріангуляції у викладеному вище вигляді непридатний для знаходження площ таких фігур. Зате тут цілком застосовний описаний вище процес квадрування, для застосування якого абсолютно не потрібна прямолінійність межі фігури.

Можна поставити питання про визначення площі, тобто числової характеристики $S(\alpha)$, для всіх квадровних фігур. Як і раніше, обов'язкова вимога, щоб числа S мали властивості 1°—4°. Можна довести (це робиться в курсах вищої математики), що задача на вимірювання площ для всього класу квадровних фігур однозначно розв'язна в тому ж розумінні, що й для класу многокутників. Під $S(\alpha)$ розуміють число, яке має ту властивість, що можна вказати многокутники α^* і α_* такі, що $S(\alpha^*)$ і $S(\alpha_*)$ як завгодно мало відрізняються від $S(\alpha)$.

ВИМІРЮВАННЯ ОБ'ЄМІВ

Питання про вимірювання об'ємів ще складніше, ніж питання про вимірювання довжин і площ. Безпосередньо порівняти тіла для визначення того, яке з них більше, найчастіше абсолютно неможливо. Тому тут відразу ж доводиться будувати геометричну теорію вимірювання об'ємів.

Як і вище, задача ставиться так. Розглянемо сукупність усіх геометричних тіл — многогранників,— кожне з яких обмежено скінченним числом многокутників. Такими тілами є, наприклад, тетраедр, ікосаедр, призма тощо. Для всіх цих многогранників, які ми позначатимемо буквами α, β, ..., треба знайти числову характеристику V, яка називається об'ємом тіла і має такі властивості:

1°. $V(\alpha) > 0$ для всіх многогранників.

2°. Якщо многогранники α і β рівні, то $V(\alpha) = V(\beta)$.

3°. Якщо многогранник α складений з многогранників β і γ, то $V(\alpha) = V(\beta) + V(\gamma)$.

4°. Якщо многогранник ω являє собою куб з стороною, що дорівнює одиниці, то $V(\omega) = 1$.

Тут так само, як і у випадку вимірювання площ, природно поставити запитання I і II, сформулювавши їх стосовно до тіл.

Для знаходження об'ємів многогранників слід, як і при вимірюванні площ, вказувати вимірювальний процес, який дозволяв би поставити у відповідність кожному многограннику α число $V(\alpha)$, яке задовольняє умови 1°—4°.

Ситуація тут у багато чому аналогічна викладеній вище відносно площ. Тут також можна побудувати процес тріангуляції, що полягає в розбиванні кожного многогранника, але, зрозуміло, не на трикутники, а на трикутні піраміди. Об'єм многогранника внаслідок властивостей 1°—4° природно при цьому вважати таким, що дорівнює сумі об'ємів трикутних пірамід, утворених при тріангуляції. Тут знов слід доводити, що знайдені таким способом величини об'ємів мають властивості 1°—4° і що об'єм не залежить від способу тріангуляції.

Основною трудністю в створенні геометричної теорії вимірювання об'ємів є доведення того, що об'єм трикутної піраміди дорівнює одній третині добутку площі основи на висоту, тобто виведення формули об'єму трикутної піраміди.

Для виведення формули площі трикутника (див. стор. 96) нам удалося розрізати трикутник на куски, з яких можна скласти прямокутник. У випадку трикутної піраміди природно спробувати розрізати її на скінченне число кусків, з яких можна було б скласти прямокутний паралелепіпед.

Виявляється, що це зробити неможливо з тієї причини, що для многогранників несправедлива теорема, аналогічна до теореми Бойай — Гервіна для многокутників.

Можна довести, що трикутну піраміду неможливо розрізати на скінченне число многогранників, з яких можна було б скласти куб чи призму. Доведення цього факту читач може знайти у згаданій вище книжці В. Г. Болтянського.

Саме цим і пояснюється те, що виведення формули $S(\Delta) = \frac{1}{2} a h_a$ для площі трикутника в шкільному курсі здійснюється дуже просто — перекроюванням трикутника в паралелограм або прямокутник, а формула для об'єму піраміди виводиться за допомогою побудови так званої «чортової драбини» і граничного переходу.

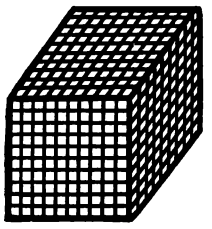


Рис. 8.

Це складніший шлях, але кінець кінцем він приводить до формули для об'єму піраміди, а отже, і до повного обгрунтування процесу тріангуляції.

Крім того, подібно до процесу квадрування плоских фігур тут можна побудувати процес кубування многогранників.

Для цього розглянемо спочатку куб ω з стороною, що дорівнює 1 (рис. 8). Поділимо кожну його сторону на 10 частин і через точки поділу проведемо площини, паралельні граням куба ω. Тоді куб ω розіб'ється на $10^3 = 1000$ рівних кубиків ω_1. Ту саму операцію виконаємо з кубиком ω_1; він розіб'ється на 10^3 кубиків ω_2 і т. д. Через те що $V(\omega) = 1$, то, користуючись властивостями 1°—3°, можна дістати:

$$V(\omega_1) = \frac{1}{10^3}; \quad V(\omega_2) = \frac{1}{100^3}; \quad \ldots$$

Далі уявімо собі, що в просторі, де розміщений многогранник α, є кубічні грати.

Підрахуємо, скільки кубів ω цілком вмістилося в многограннику α. Нехай їх буде k штук. Далі, нехай в частині многогранника α, що залишилася, вмістилося k_1 кубиків ω_1 і т. д.

Беручи до уваги властивості 1°—4°, природно вважати, що об'єм многогранника α дорівнює

$$V(\alpha) = k + \frac{k_1}{10^3} + \frac{k_2}{100^3} + \ldots$$

Можна довести, що чисельні результати процесів тріангуляції та кубування збігаються і що знайдені при цьому числа задовольняють умови 1° — 4°.

Одержувані тут результати цілком аналогічні до результатів, зазначених раніше для задач на вимірювання довжин і площ.

Зауважимо ще, що аналогічно до задачі про вимірювання площ криволінійних фігур можна формулювати задачу про вимірювання об'ємів тіл, обмежених кривими поверхнями. Тут потрібні міркування, подібні до наведених у кінці розділу цієї статті, присвяченого вимірюванню площ.

ГЕОМЕТРИЧНІ ВІДОБРАЖЕННЯ

З різноманітними геометричними відображеннями (або перетвореннями) нам дуже часто доводиться зустрічатися в математиці, техніці і повсякденному житті. Що ж це таке?

Для того щоб з'ясувати суть відображень (перетворень), розглянемо кілька прикладів.

Учитель у класі рисує на дошці геометричну фігуру, а учні перерисовують її в свої зошити (рис. 1). В даному разі учні відтворюють у зошитах зроблений вчителем рисунок, тобто відображають його на аркушах паперу.

Промені сонця, що падають на фігурну огорожу, також дають досить цікавий приклад відображення у вигляді тіні, яка часто дивовижно спотворює справжню форму і розміри огорожі (рис. 2). Кожна точка A грат заступає від сонячного проміння тільки одну точку A' поверхні землі. Таким чином, відображення переводить кожну точку A огорожі (яку можна вважати розміщеною у вертикальній площині) в певну точку A' земної поверхні (яку наближено можна розглядати як горизонтальну площину). Будь-яке правило, за яким кожній точці A певної фігури (можливо, цілої площини) або тіла відповідає якась точка A' другої або тієї ж самої фігури (чи тіла), дає нам відображення, або перетворення.

Отже, геометричне відображення переводить кожну фігуру Φ у нову фігуру Φ'. При цьому фігура Φ' може більше чи менше відрізнятися від вихідної фігури Φ.

Рисунок, перемальований школярем із зошита товариша, може майже не відрізнятися від вихідного; єдина відмінність між цими двома рисунками та, що вони містяться на різних аркушах паперу. Значно більші відмінності між рисунком, зробленим вчителем на дош-

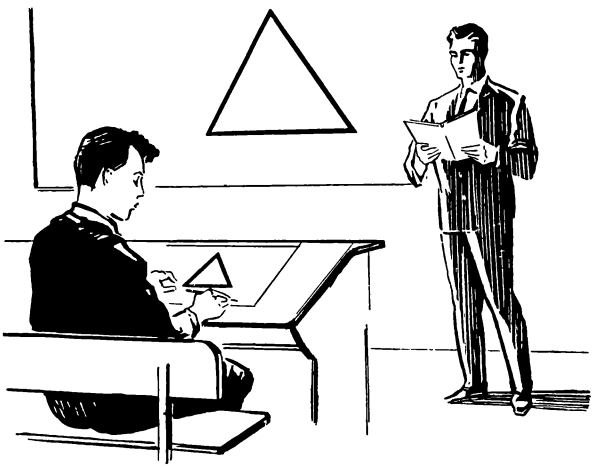


Рис. 1. Трикутник, нарисований у зошиті,—це відображення трикутника, зображеного на дошці.

ці, і його копіями в зошитах учнів. Проте і тут зберігається достатня схожість рисунків: вони відрізняються лише своїми розмірами. Ця схожість настільки велика, що вчитель іноді може запропонувати учням точно відтворити в зошитах його рисунок; інакше кажучи, він вважає відмінність у розмірах рисунків неістотною і схильний визнати однаковими різні за масштабами рисунки на дошці і в зошиті. Ще більші відмінності між огорожею та її тінню. Однак і тут можна знайти багато спільного між обома фігурами. Тінь від предмета, освітленого ліхтарем, більше відрізняється від самого предмета, ніж його тінь на сонці. Адже промені ліхтаря сходяться в одній точці, тобто являють собою розбіжний пучок, а промені сонця можна вважати паралельними, бо сонце перебуває дуже далеко від освітлюваного предмета. Ліхтар може відобразити, наприклад, круглий обідок автомобільної фари у зовсім не схожу на круг фігуру (рис. 3).

РУХИ І ВІДОБРАЖЕННЯ ПОДІБНОСТІ

Відображення, які зберігають форму і розміри фігур та змінюють тільки їх положення, називаються рухами. В геометрії широко застосовується так зване паралельне перенесення — такий рух, при якому всі відрізки, що сполучають дві точки A і A', які відповідають одна одній, мають одну й ту ж довжину, один і той же напрям (рис. 4), і обертання навколо якоїсь точки O на певний кут φ. При цьому, останньому, відображенні кожна точка A переходить у точку A', віддалену від O на ту саму відстань, що й A, і таку, що $\angle A'OA = \varphi$ (рис. 5). Обертання навколо точки O на 180° називається симетрією відносно точки O; тут кожна точка A переходить у таку точку A', що O є середина відрізка AA'.

Інший цікавий приклад руху дає нам симетрія відносно прямої l, де кожна точка A переходить у таку точку A', що відрізок AA' перпендикулярний до прямої l і ділиться цією прямою пополам (рис. 6). Кожен з нас може легко дістати симетричні фігури, зробивши кляксу на аркуші паперу і потім перегнувши цей аркуш (рис. 7).

Відображення, які змінюють тільки розміри фігур, а не їх форму, називаються

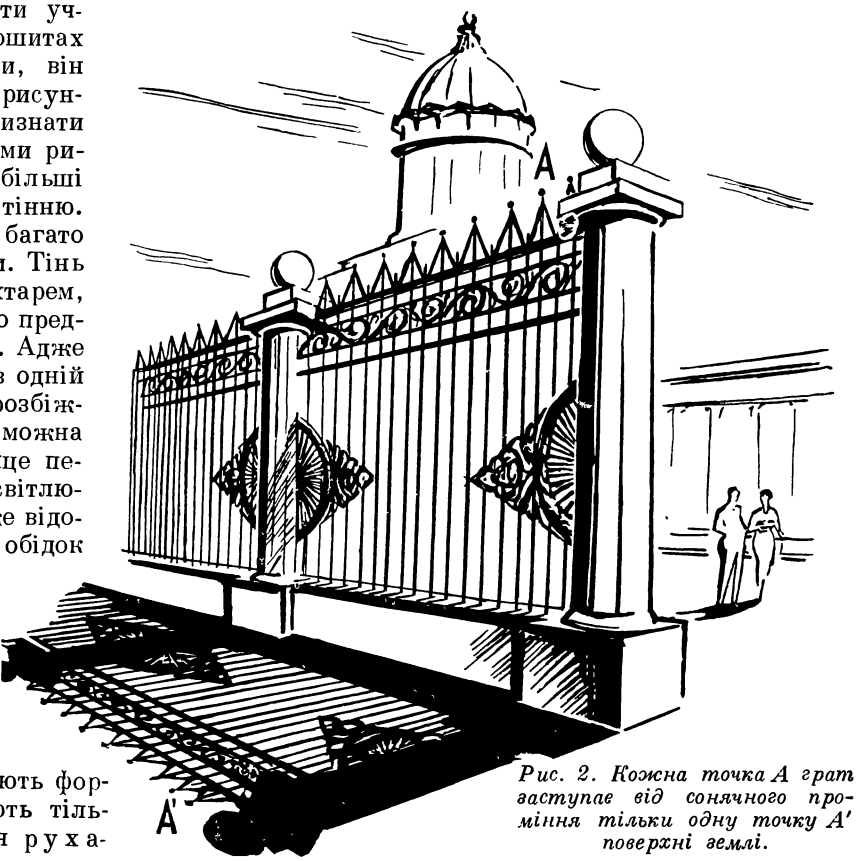


Рис. 2. Кожна точка A грат заступав від сонячного проміння тільки одну точку A' поверхні землі.

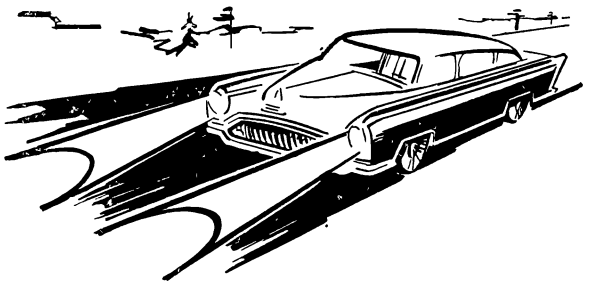


Рис. 3. Ліхтар відображає круглий обідок автомобільної фари в зовсім не схожу на круг фігуру.

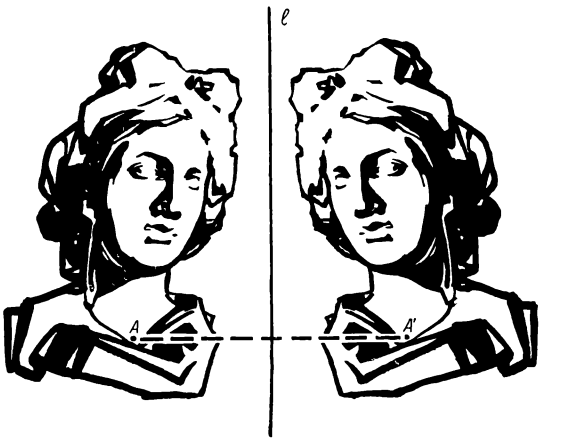


Рис. 6. Симетрія відносно прямої.

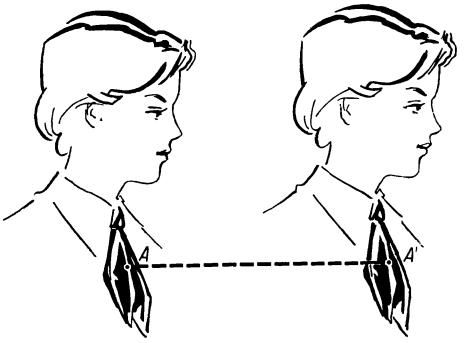


Рис. 4. Паралельне перенесення.

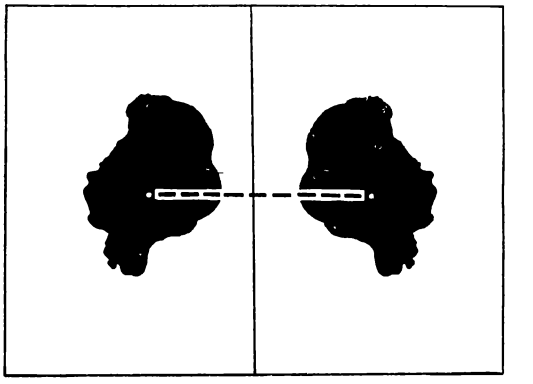


Рис. 7. Як можна зробити симетричні клякси.

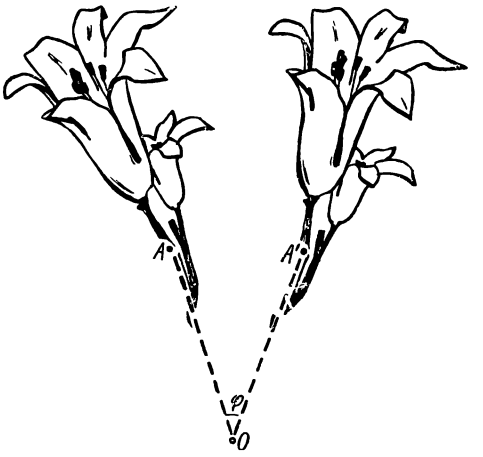


Рис. 5. Обертання на кут φ.

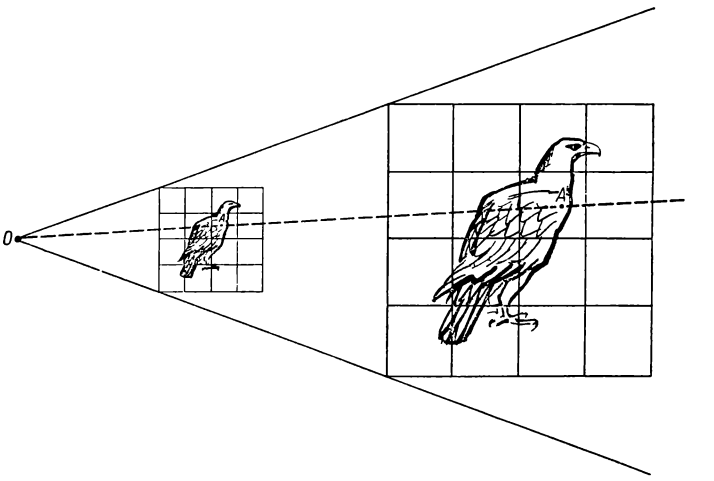


Рис. 8. Гомотетія з центром O.

відображеннями подібності. Найбільш відомим прикладом такого відображення є стискання до точки O, або гомотетія з центром O (рис. 8), при якому кожна точка A так переміщується по променю OA, що відстань її від O помножається на стале число k (зауважимо, що при k, більшому 1, це перетворення слід було б називати не «стисканням до точки», а «розтягненням від точки»).

Рухи і перетворення подібності використовуються в геометрії саме тому, що вони не змінюють форми геометричних фігур. Нехай, наприклад, ми повинні побудувати (циркулем та лінійкою) трикутник, знаючи дві його сторони AB і AC та медіану AM, що міститься між цими сторонами (рис. 9). Тут нам дано три відрізки. Однак розміщені вони на рисунку дуже невдало — всі відрізки виходять з однієї точки і не утворюють ніякого трикутника. Тому спочатку ми можемо не побачити шляхів розв'язання задачі.

Але в нас може виникнути вдала думка — повернути на 180° навколо точки M зображений на рис. 9 трикутник AMC. При цьому точка C перейде в точку B (бо M — середина відрізка BC), а точка A — в таку точку A' прямої AM, що M буде серединою відрізка AA' (тобто $AA' = 2AM$), так що трикутник AMC займе нове положення $A'MB$. В результаті цього перетворення ми дістаємо (рис. 10) трикутник ABA' з відомими сторонами AB, $AA' = 2AM$ і $A'B = AC$ (обертання на 180°, як і всякий рух, не змінює довжини відрізків!). Побудувавши цей трикутник, ми потім легко побудуємо вихідний трикутник ABC.

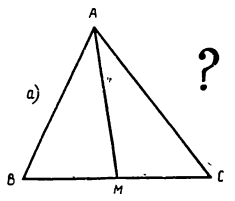


Рис. 9.

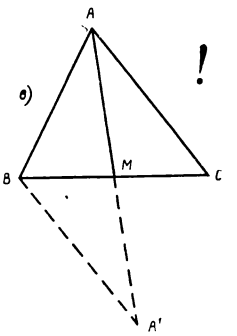


Рис. 10.

Ось ще одна задача: знайти геометричне місце середин хорд кола, які проходять через його певну точку M. Для розв'язання цієї задачі досить зауважити, що перетворення, яке ставить у відповідність кінцю A хорди MA її середину A', є гомотетія з центром M. А через те що гомотетія не змінює форми фігур, то шукане геометричне місце також є коло (рис. 11).

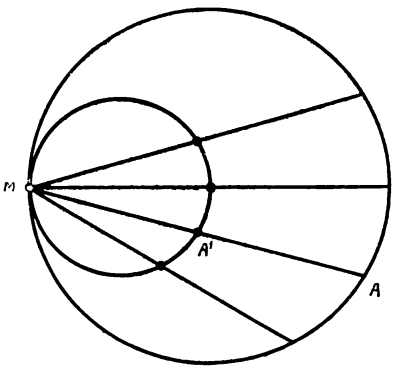


Рис. 11. Геометричним місцем середин хорд кола, що виходять з однієї точки M, є також коло.

Дуже часто можна використовувати для доведення геометричних теорем симетрію відносно прямої. Так, наприклад, можна бути певним, що пряма, яка сполучає середини M і N основ рівнобедреної трапеції, проходить і через точку E перетину діагоналей, і через точку F перетину бічних сторін (рис. 12). Справді, пряма MN, очевидно, є віссю симетрії рисунка 12, тобто при симетрії відносно MN цей рисунок переходить у себе. Тому діагоналі AC і BD обов'язково перетинаються в точці E осі MN, бо коли б це було не так, то симетрія відносно MN перевела б E в іншу точку — E', яка також належала б обом діагоналям, а точка перетину діагоналей може бути тільки одна. Так само можна показати, що точка F перетину бічних сторін належить осі симетрії MN.

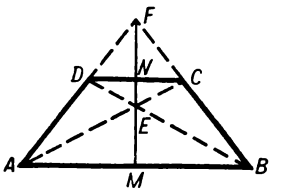


Рис. 12.

ДЕЯКІ СКЛАДНІШІ ВІДОБРАЖЕННЯ

А чи можуть застосовуватися в геометрії відображення, що спотворюють також форму геометричної фігури (на зразок показаного на рис. 2)? Якщо, крім того, що відображення змінює форму фігур, нам про нього нічого більше не відомо, використати його в геометрії, звичайно, неможливо. Використати певне відображення в геометричних задачах можна, знаючи лише, що́ воно зберігає; інакше кажучи, треба знати, які властивості перетвореної фігури Φ' збігаються з властивостями вихідної фігури Φ.

Щоб проілюструвати це, спинимося на так званих лінійних перетвореннях, які

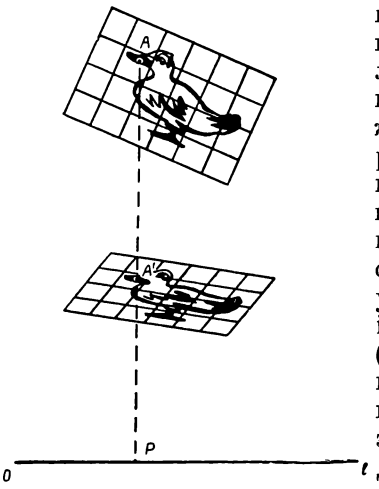


Рис. 13. Стискання до прямої.

переводять прямі лінії знову у прямі лінії. До лінійних перетворень належить і зображене на рис. 2 паралельне проектування, де кожна точка A деякої площини π (площина огорожі) переходить у таку точку A' іншої площини π' (площина землі), що пряма AA' (сонячний промінь) паралельна заданому напряму. До лінійних перетворень належить також так зване стискання до прямої ol, яке переводить кожну точку A в таку точку A' опущеного з A на пряму ol перпендикуляра AP, що відстань $A'P$ точки A' від ol менша (або більша) від відстані AP в стале число k раз (рис. 13; якщо $A'P$ більше AP, то доречніше було б говорити про «розтягнення від прямої ol»). Лінійні перетворення переводять паралельні прямі в паралельні прямі і зберігають відношення відрізків однієї прямої (але не різних прямих!). Справді,

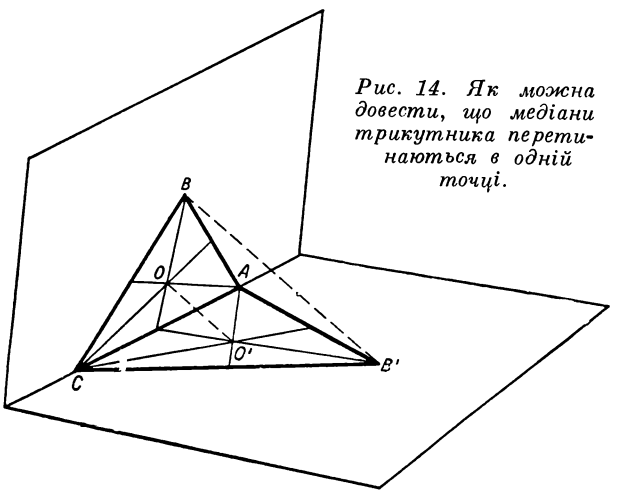


Рис. 14. Як можна довести, що медіани трикутника перетинаються в одній точці.

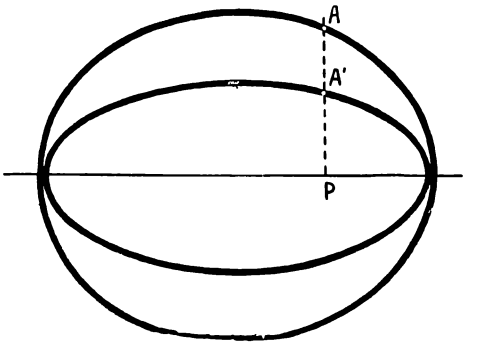


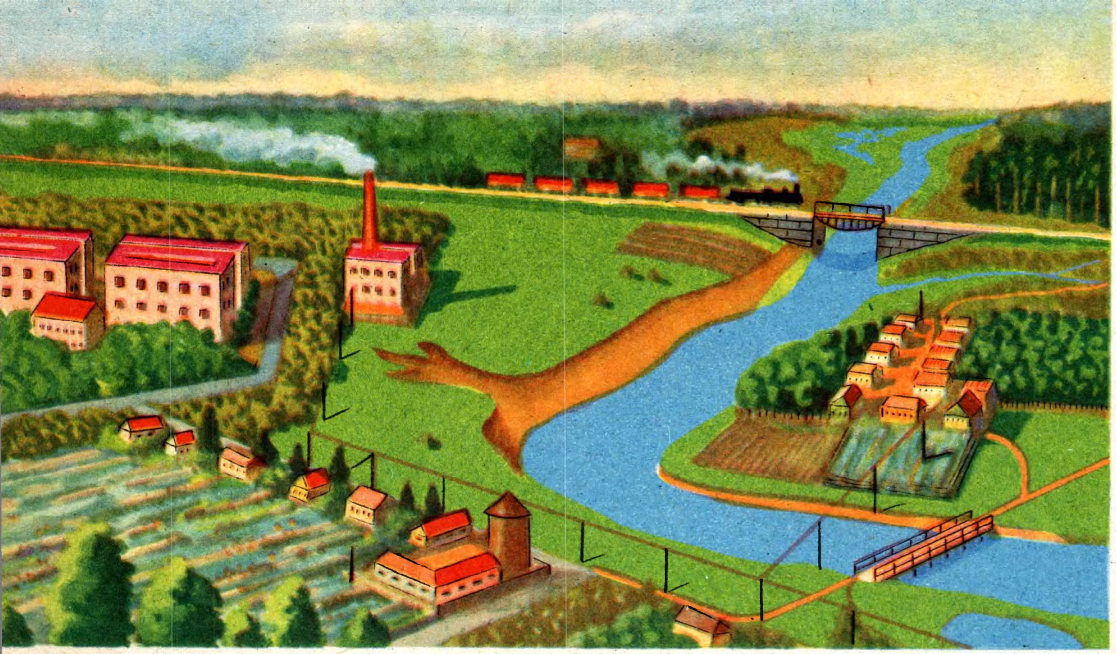
Рис. 15. Еліпс утворюється стисканням кола до діаметра.

неважко переконатися, що паралельне проектування і стискання до прямої мають ці властивості.

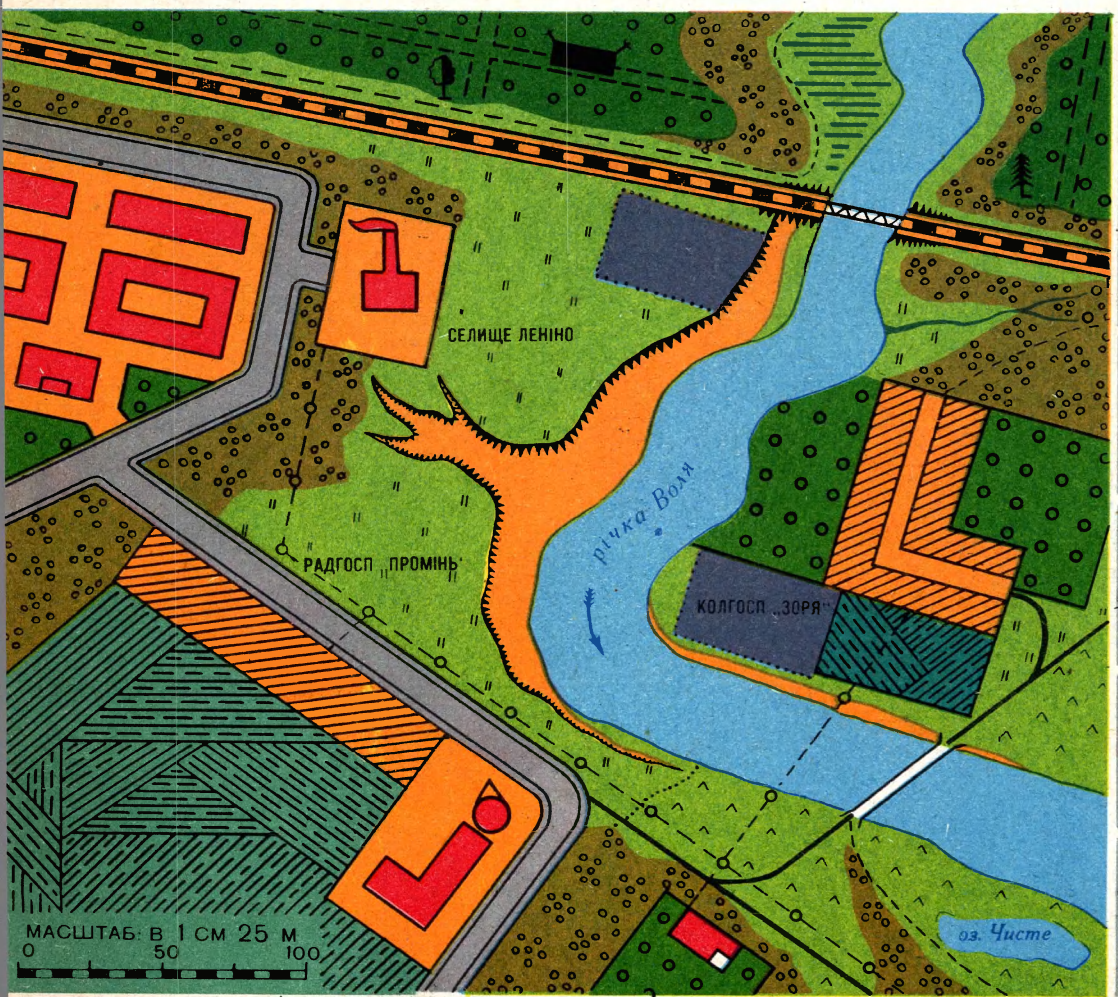
Скористуємося тепер лінійними перетвореннями, щоб довести теорему: «Медіани трикутника перетинаються в одній точці». В школі цю теорему доводять за допомогою деяких допоміжних ліній (але як догадатися, що саме ці лінії треба провести?) і вивчення утвореної досить складної фігури. У цьому відношенні теореми про перетин в одній точці бісектрис трикутника або перпендикулярів, поставлених до сторін трикутника в їх серединах, значно простіші, бо їх доведення не потребує проведення жодних нових ліній. З допомогою паралельного проектування ми можемо довільний трикутник ABC перетворити у рівносторонній трикутник $AB'C$ (рис. 14); при цьому медіани трикутника ABC перейдуть у медіани трикутника $AB'C$ (бо лінійне перетворення переводить середину будь-якого відрізка в середину перетвореного відрізка). Але через те що медіани трикутника $AB'C$ перетинаються в одній точці O' (бо вони є також бісектрисами або перпендикулярами, поставленими з середин сторін), то і медіани трикутника ABC перетнуться в одній точці O (саме в точці, яка проектується в точку O'). Аналогічно до цього можна довести, що медіани діляться в точці їх перетину у відношенні 2 : 1, рахуючи від вершини (як?).

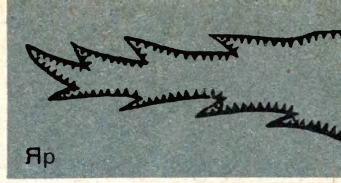
Розглянемо інший приклад використання лінійних перетворень — виведення властиво-

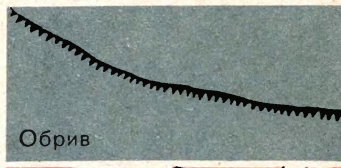
Таблиця 4. Симетрія — приклад геометричного відображення, яке дуже часто зустрічається в природі і техніці. На цьому малюнку зображено гілочку, квітку, літак, гребний гвинт та інші тіла, а також фігури, які дістаємо при ортогональному проектуванні (ще один приклад відображення!) цих предметів на площину (тобто вигляд цих тіл зверху). Легко бачити, що всі ці тіла і фігури симетричні, тобто переводяться в себе деякою симетрією відносно прямої, точки або площини.



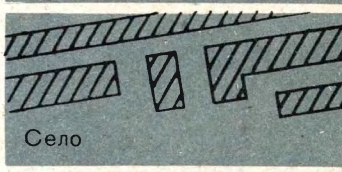
ВИГЛЯД МІСЦЕВОСТІ ТА ЇЇ ТОПОГРАФІЧНИЙ ПЛАН В МАСШТАБІ 1:2 500




Яр


Обрив

Селище міського типу

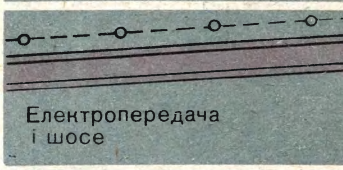

Село

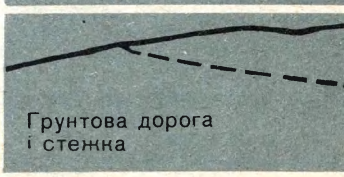
Школа і окремий двір

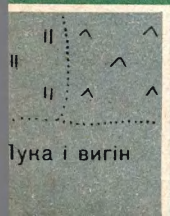
Скотний двір і силосна башта

Завод і лісництво

Залізнична колія і міст


Електропередача і шосе


Грунтова дорога і стежка

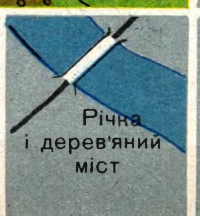

Лука і вигін

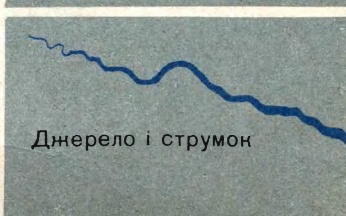
Листяний і хвойний ліси та просіка

Сад і город

Кущі і рілля

Озеро і болото


Річка і дерев'яний міст


Джерело і струмок

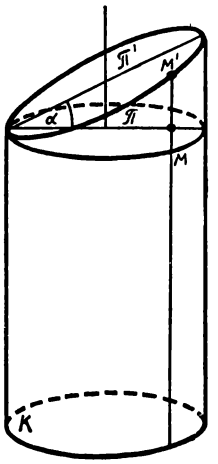


Рис. 16. Еліпс — переріз кругового циліндра довільною площиною.

стей еліпса. Відомо, що еліпсом називається крива, в яку переходить коло при стисканні його до діаметра (рис. 15). Еліпс можна означити і як лінію, що утворюється при перерізі довільною площиною кругового циліндра (рис. 16), а це означає, що еліпс утворюється з кола в результаті паралельного проектування (з площини π на площину π').

Доведемо, наприклад, що *геометричним місцем середин паралельних хорд еліпса є відрізок прямої*. Геометричним місцем середин паралельних хорд кола є перпендикулярна до цих хорд пряма (рис. 17, *а*). Тому і для еліпса аналогічне геометричне місце буде прямою лінією (рис. 17, *б*). Справді, при стисканні або при паралельному проектуванні паралельні хорди кола переходять у паралельні між собою хорди еліпса і діаметр, що ділить всі ці хорди пополам, переходить у пряму, яка ділить пополам всі хорди еліпса.

Зауважимо, що смисл використання лінійних перетворень часто полягає в тому, що вони дають змогу застосовувати у складніших випадках прості міркування, зв'язані з симетрією фігур. Так, при доведенні теореми про еліпс ми зводили її до теореми про коло і користувалися тим, що будь-який діаметр кола є його *віссю симетрії*. Так само і теорему про точку перетину медіан трикутника ми зводимо до тієї ж теореми для рівностороннього трикутника, для якого міркування значно спрощуються через те, що цей трикутник — фігура дуже симетрична (він має три осі симетрії). Аналогічно до цього можна довести, наприклад, що пряма, яка сполучає точку перетину діагоналей і точку перетину бічних сторін довільної трапеції, ділить основи трапеції пополам (рис. 18): для доведення досить, наприклад, спроектувати трикутник ABF у рівнобедрений і тим звести рис. 18 у симетричний рис. 12. Близькі до цього і шляхи застосування в геометрії інших типів перетворень (порівняйте, наприклад, несиметричний рис. 20, *а* і симетричний рис. 20, *б* у кінці статті).

Поряд з лінійними перетвореннями сучасна геометрія знає багато інших цікавих перетворень. Докладно вивчені, наприклад, так звані к о л о в і п е р е т в о р е н н я, що переводять кола в кола. Прикладом колового перетворення є і н в е р с і я, або симетрія відносно кола S з центром O, при якій кожна точка A, зовнішня відносно кола S, переходить у точку A' перетину прямої OA з хордою PQ, що сполучає точки дотику з колом S дотичних, проведених до нього з точки A (рис. 19). Можна довести, що кожне коло інверсія переводить знову в коло (або в пряму, яку можна вважати «колом нескінченно великого радіуса»).

Знає геометрія і перетворення з ще більш несподіваними властивостями.

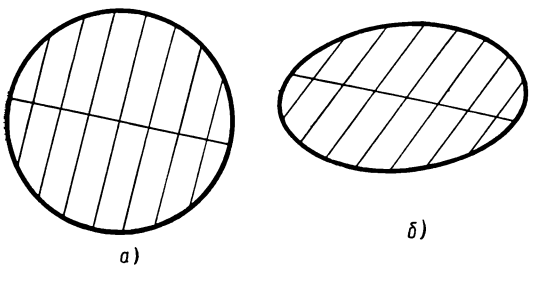


Рис. 17. Геометричним місцем середин паралельних хорд еліпса є відрізок прямої.

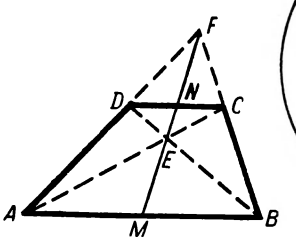


Рис. 18.

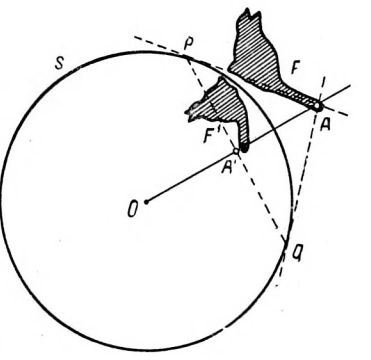


Рис. 19. Інверсія (симетрія відносно кола).

Таблиця 5. План і карта — це відображення якої-небудь ділянки земної поверхні на аркуш паперу. На зображеному тут плані можна знайти точки, що відповідають наріжним кутам фабричного будинку, центру силосної башти і навіть переднім колесам паровоза (точніше, положенню цих коліс у зображений на верхньому малюнку момент; через кілька хвилин паровоз буде знаходитись вже в іншому пункті і положенню його коліс відповідатимуть на плані інші точки).

ВІДОБРАЖЕННЯ ЯК ОСНОВА КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕОРЕМ

Німецький математик Фелікс Клейн наприкінці минулого століття запропонував покласти геометричні перетворення (відображення) в основу класифікації всіх властивостей геометричних фігур. Він запропонував розрізняти геометричні властивості за тими перетвореннями, які ці властивості зберігають. До однієї групи при цьому належатимуть ті властивості, які зберігаються лише при рухах фігур; сюди належать всі властивості, зв'язані з відстанями між точками. До другої групи потраплять властивості, які зберігаються при перетвореннях (відображеннях) подібності (наприклад, всі властивості, зв'язані з величинами кутів); ще одну групу становитимуть властивості, які зберігаються при лінійних перетвореннях. Але через те що лінійні перетворення змінюють фігури сильніше, ніж рухи, то властивості, які зберігаються при цих перетвореннях, слід вважати глибшими. З цієї точки зору властивість трикутника, що виражається теоремою: «Медіани трикутника перетинаються в одній точці», глибша, ніж аналогічна властивість висот трикутника.

Така класифікація геометричних властивостей пояснює ту дивну, здавалося б, обставину, що відображення (на зразок паралельного проектування), які спотворюють фігуру, можуть бути використані для доведення теорем, що стосуються цієї фігури. Справді, є чимало таких властивостей геометричних фігур, які повністю зберігаються при паралельному проектуванні; при доведенні саме цих властивостей ми і можемо використати проектування. Так, вище ми вже зазначили, що при доведенні теореми про точку перетину медіан трикутника можна без о б м е ж е н н я з а г а л ь н о с т і

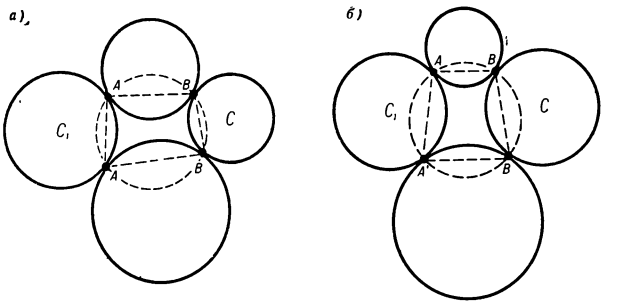


Рис. 20. Точки A, B, A', B' лежать на одному колі.

вважати розглядуваний трикутник рівностороннім (бо кожен трикутник можна спроектувати в рівносторонній); це значно полегшує доведення теореми.

На протилежність до цього при доведенні теореми «Висоти трикутника перетинаються в одній точці» ми не маємо права вважати трикутник рівностороннім, бо якщо ми спроектуємо трикутник ABC в новий трикутник $AB'C$, то висоти трикутника ABC не перейдуть у висоти трикутника $AB'C$.

Як ще один приклад можна розглянути таку теорему: якщо одне коло (зовнішнє) дотикається до двох непересічних кіл C і C_1 у точках A і B, а друге коло — в точках A' і B', то точки A, B, A' і B' лежать на одному колі (рис. 20, *а*). Властив'сть кіл, що становить зміст цієї теореми, зберігається при інверсії. Але інверсією можна будь-які два кола перевести у р і в н і кола. Тому ми можемо вважати кола C і C_1 рівними, у зв'язку з чим наша теорема стає майже очевидною (бо чотирикутник $A'B'BA$ на рис. 20,*б* — рівнобедрена трапеція).

Отже, точка зору Клейна може допомогти при знаходженні шляхів доведень тих чи інших теорем геометрії.

ПРО РІЗНІ ГЕОМЕТРІЇ

З ЧОГО ПОЧИНАЄТЬСЯ ВИКЛАД ГЕОМЕТРІЇ

Розгорнемо підручник геометрії і розглянемо означення якого-небудь геометричного поняття, наприклад трапеції. Намагаючись повністю його зрозуміти, ми відразу ж виявимо, що треба заздалегідь знати означення паралельності прямих і означення чотирикутника, а для цього треба знати означення відрізка. Останнє потребує знання того, що таке пряма і точка.

Всяке інше означення так само кінець кінцем приводить нас до тих же початкових понять: до прямої і точки або до прямої, точки і площини. Значить, точка, пряма і площина — основні геометричні поняття, і ми маємо право сподіватися знайти відповідні означення на перших сторінках підручника.

Але, на жаль, нас чекає розчарування. Виявляється, що і на перших сторінках підручника немає точних математичних означень точки, прямої і площини. В той же час всі означення, які спираються на ці основні геометричні поняття, сформульовані з повною математичною строгістю. Таке положення на перший погляд може здатися дуже дивним.

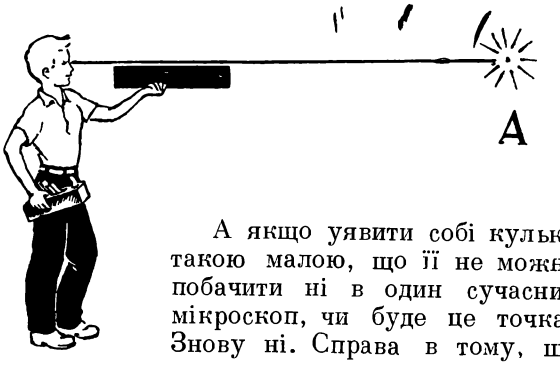
Правда, на початку підручника даються деякі пояснення того, що ж все-таки ми розуміємо під точкою, прямою і площиною. Однак ці пояснення ні в якій мірі не можуть бути точними математичними означеннями. Крім того, ці пояснення ніде в доведенні теорем не використовуються. Важливою є лише вказівка на те, що в дальшому вивчатимуться саме точки, прямі і площини.

Що ж таке точка, пряма і площина?

Насамперед зауважимо, що ніде в природі не зустрічаються геометричні точки, прямі і площини.

Уявімо собі кульку малого діаметра, скажімо 1 *мм*. Зменшимо її діаметр вдвоє, втроє, в тисячу разів і т. д. Чи настане момент, коли вже дуже малу кульку можна буде назвати точкою? Ні!

Учитель ставить на дошці дуже «жирну» точку. Учні малюють у зошитах теж дуже великі точки. Насправді в усіх цих випадках зображаються маленькі кружечки. Але чи це точки? Зорі на небі теж ми уявляємо «точками», хоч деякі з них у багато разів більші від Сонця.



А якщо уявити собі кульку такою малою, що її не можна побачити ні в один сучасний мікроскоп, чи буде це точка? Знову ні. Справа в тому, що точка — це не якийсь конкретний предмет. Точка — це п о н я т т я, абстрактне поняття, утворене нашою свідомістю в результаті тривалого спостереження дуже малих (або таких, що здаються малими при певних умовах) реальних об'єктів — кульок, кружечків тощо.

Цьому абстрактному поняттю точки ми надаємо ряд властивостей, спільних для тих конкретних предметів, в результаті спостереження за якими і виникло поняття точки.

Звернемося тепер до поняття прямої. На папері зображена лінія. Чи пряма вона? Як у цьому переконатися? Треба прикласти лінійку, порівняти лінію з краєм лінійки. Але при цьому виникає питання: чи пряма наша лінійка? Кожному, очевидно, доводилося бачити столяра, який для перевірки прямизни виструганої планки розглядає її так, як показано на рисунку. Якщо лінійка не пряма, це буде добре видно на світло. Таким чином, перевіряючи прямизну зробленої лінійки, її порівнюють з променем світла. Так само стоїть справа і з туго натягнутою ниткою, яку практично вважають прямою. Щоб переконатися, що нитку добре натягнуто і вона не провисає, треба знову-таки глянути вздовж нитки, тобто (як і планку) порівняти її з променем світла.

Отже, поняття прямої лінії ми запозичуємо з природи при розгляді променів світла. Але це запозичення не таке вже просте — адже ніде в природі не зустрічається те, що ми називаємо «одним променем світла».

Припустимо, що світло невеликого джерела (рис. 1) пропускають крізь малий отвір. Утвориться вузький пучок світла. Уявімо собі, що отвір весь час зменшується і джерело світла теж зменшується. Тоді пучок, який виходить з отвору, ставатиме чимраз вужчим і вужчим. Звичайно, цей пучок ніколи не стане про-

менем, коли б навіть і можна було його зробити як завгодно вузьким[1].

Ось коли б джерело світла A було точкою і отвір B теж був точкою — тоді б пучок став променем. Але ж ми говорили про те, що в реальному світі точок не буває, отже, не буває і променів. Таким чином, і світловий промінь (тобто пряма) є абстрактним поняттям, хоч воно й пов'язано з реальними явищами та має фізичне походження.

Креслячи на папері пряму, ми тільки створюємо реальний образ — рисунок, намагаючись в тій чи іншій (потрібній нам) мірі зробити його подібним до тих фізичних об'єктів, з яких викристалізувалося абстрактне поняття прямої.

І тут, як і у випадку точки, абстрактне поняття прямої ми наділяємо всіма властивостями, спільними для тих конкретних предметів, в результаті спостереження над якими виникло саме поняття прямої.

Так само стоїть справа і з площиною. Уявімо собі, що світло джерела A пропускають крізь «пряму» щілину (рис. 2). «Прямизну» щілини можна в потрібній нам мірі перевірити за допомогою нашого «еталона» — променя світла — так, як зазначено вище.

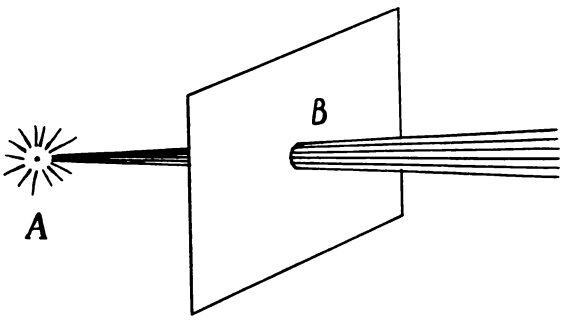


Рис. 1. Уявлення про пряму дає промінь світла, що проходить через малий отвір.

Утворюється зображений на рисунку пучок світла. Коли б вдалося зменшити розмір джерела до «ідеальної» точки і звузити щілину до «ідеальної» прямої, пучок світла став би «ідеальною» площиною. Тут застосовні всі міркування, наведені вище при розгляді поняття прямої, і ми на них не спинятимемося. Отже, ми бачимо, що основні геометричні поняття — точка, пряма, площина — виникають

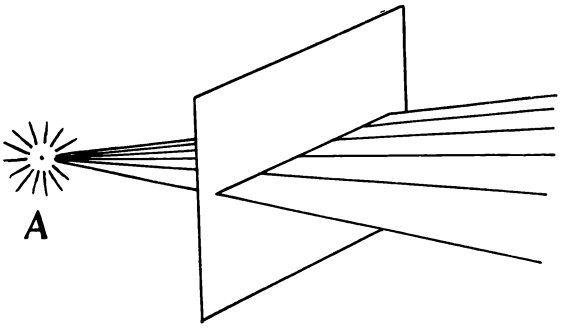


Рис. 2. Уявлення про площину дає світло, що проходить через вузьку прямолінійну щілину.

при розгляді дуже реальних речей — променів світла, натягнутих ниток, лінійок тощо. Як же тепер вивчати властивості цих геометричних понять? Можливо, треба на кожному кроці звертатися до властивостей променів світла і натягнутих ниток, а кожну геометричну теорему просто перевіряти побудовою? Ні, так робити нам не вдасться! Адже при створенні геометричних понять ми абстрагувалися від багатьох властивостей реальних речей: ми не враховували дифракції та заломлення світла, провисання натягнутої нитки та її товщини і т. д. Отже, хоч властивості геометричних об'єктів і відбивають властивості реальних речей, але ця відповідність лише приблизна. Тому геометричне твердження треба довести.

Але що, власне, означають слова: довести геометричне твердження?

ЩО ТАКЕ АКСІОМИ

Кожному школяреві добре відомо, як важко зрозуміти зміст і повністю розібрати доведення довільно взятої теореми шкільного підручника геометрії, не вивчивши старанно всього викладеного в підручнику до цієї теореми. Кожна теорема спирається на попередні. Одна теорема чіпляється за іншу. І ось, якщо ми підемо за підручником геометрії від кінця до початку, то на його початку знайдемо кілька тверджень, які ніяк не доводяться, а приймаються за очевидні. Ці твердження називаються аксіомами. І, щоб довести геометричне твердження, його треба звести з допомогою логічних міркувань до аксіом.

Звідки ж, проте, взялися самі аксіоми?

Геометрія вивчає точки, прямі та площини. Як пояснювалося вище, ці основні поняття

[1] У цьому мисленому, «ідеальному» експерименті ми навмисно не враховуємо фізичних явищ, що виникають тут: дифракцію, заломлення тощо.

геометрії повинні мати якості, властиві тим реальним предметам, спостереження над якими і дало людині можливість створити вказані абстрактні поняття.

Саме ці властивості і повинні бути вихідними у формулюванні аксіом.

Отже, аксіоми виражають властивості реальних речей, які зустрічаються в природі: малих кульок, отворів, вузьких пучків світла тощо.

Які ж властивості точок, променів світла приймають за аксіоми? Природно, такі властивості, які перевірені людським досвідом протягом тисячоліть, в яких ми не сумніваємося, тому що їх багато разів перевіряли і підтверджували експериментами. Експерименти, покладені в основу формулювання аксіом, здійснювалися, звісно, не над абстрактними поняттями точки, прямої і площини, а над цілком конкретними, реальними об'єктами: кульками, отворами, світловими «снопиками» тощо. В міру того як ці реальні об'єкти ставали в свідомості людини поняттями точки, прямої, площини, викристалізувалися і властивості прямих, точок та площин, сформульовані згодом у вигляді аксіом.

Так були виявлені, наприклад, такі властивості точок і променів (прямих):

1. Через всякі дві точки можна провести пряму.

2. Через дві дані точки не можна провести двох різних прямих.

3. На кожній прямій є хоч би дві точки і т. д.

Ці і деякі інші твердження в сучасній геометрії приймаються за аксіоми. Ними постійно користуються для доведення різних теорем. При цьому категорично забороняється користуватися в процесі доведення теорем навіть цілком очевидними на перший погляд твердженнями, якщо їх немає серед аксіом.

Звичайно, сформульовані вище аксіоми — це далеко не повний перелік очевидних тверджень, перевірених досвідом. Не викликають сумніву, наприклад, такі твердження:

1. У кожній точці даної прямої можна поставити до неї єдиний перпендикуляр.

2. На кожній прямій є безліч точок та ін.

І все ж ці твердження доводять, як теореми, виходячи з попередніх аксіом. Не можна всі твердження, що здаються вірними, приймати за аксіоми, їх повинно бути по можливості небагато. Коли б серед них зустрілося твердження, яке можна довести логічно, виходячи з попередніх аксіом, то це твердження нічого було б приймати за аксіому. Це вже теорема.

З другого боку, аксіом повинно бути і не дуже мало. Цих аксіом повинно бути досить для того, щоб на їх фундаменті можна було побудувати всю геометрію та розв'язувати задачі, які ставить перед нею практика. Першим намагався скласти список аксіом геометрії великий грецький геометр Евклід (див. статтю «Як виникла геометрія»). Однак його список аксіом був дуже неповний, і насправді Евклід часто вдавався до рисунка, щоб доводити геометричні теореми. Повний список геометричних аксіом дав у 1899 р. німецький математик Д. Гільберт. Тепер налічують два десятки аксіом. Серед них є і такі, які в школі вважають теоремами, наприклад перша ознака рівності трикутників.

Може виникнути питання: чому ті, а не інші твердження були прийняті як аксіоми? Адже можна було б як аксіому взяти, наприклад, теорему про те, що в кожній точці прямої можна поставити до неї єдиний перпендикуляр, але зате яку-небудь з прийнятих аксіом уже доводити, як теорему. Звичайно, це так. Проте для нас це питання не принципове. Це справа історичного порядку, питання традиції, і ми залишимо його осторонь.

При аксіоматичній побудові геометрії на запитання, що ж таке точка, пряма і площина, ми можемо відповісти цілком певно. *Це абстрактні поняття, які мають всі властивості, перелічені в аксіомах.* Нічого іншого про них сказати не можна, та й не треба. Адже при доведенні теорем нічим іншим, крім аксіом, не користуються.

АКСІОМА ПРО ПАРАЛЕЛЬНІ

Отже, ми вибрали систему аксіом і збираємося будувати на її базі всю геометрію. А висновки, одержані в геометрії у вигляді різних теорем, потрібні фізикам, інженерам, виробничникам для того, щоб з їх допомогою визначати величини, які не можна виміряти безпосередньо. Але чим більша будівля, тим міцніший повинен бути фундамент. Тому вчені почали старанно перевіряти міцність фундаменту в геометрії — з'ясовувати, чи повністю відповідають геометричні аксіоми фактам реального світу. Першою була піддана перевірці аксіома про паралельні.

Ви пам'ятаєте, звичайно, таку теорему: *Дві прямі, перпендикулярні до третьої прямої, не перетинаються.* (Її легко довести з

допомогою теореми про зовнішній кут трикутника).

Дамо тепер таке означення:

Дві прямі, що лежать в одній площині і не перетинаються, називаються п а р а л е л ь н и м и.

З щойно поданої теореми виходить, що паралельні прямі існують.

Нехай тепер на площині дано пряму a і точку A (рис. 3). Ясно, що через точку A можна провести пряму b, паралельну a. Для цього досить опустити з точки A перпендикуляр AB на пряму a, а потім з точки A провести пряму b, перпендикулярну до AB. Це і буде шукана паралельна. Тепер постає запитання, чи не можна через точку A провести ще одну пряму — b', так само паралельну прямій a. (Нагадаємо, що все відбувається в одній площині, тобто ми займаємося тільки планіметрією). Тому, хто не думав над цим раніше, не вивчав цього питання, хочеться негайно і категорично відповісти: ні, не можна — пряма b' перетне пряму a; можливо, дуже далеко, але перетне!

Утримаємося поки що від такої категоричної відповіді і постараємося вдуматися в поставлене запитання глибше.

Візьмемо на прямій a точку C і сполучимо її з точкою A прямою c. Тепер пересуватимемо точку C вправо по прямій a. При цьому пряма c повертатиметься навколо точки A. Ясно, що пряма c ніколи не зіллється з прямою b, бо b з a не перетинаються. Але пряма c, повертаючись в одному й тому ж напрямі, необмежено наближатиметься до якогось певного граничного положення, коли точка C необмежено віддалятиметься вправо. Тепер запитаємо себе: чи буде пряма b тією граничною прямою, до якої необмежено наближається пряма c? Або, можливо, пряма c необмежено наближатиметься до граничної прямої b', відмінної від b, так що пряма c, повертаючись, не зможе ввійти всередину кута α? Знову хочеться відкинути це припущення.

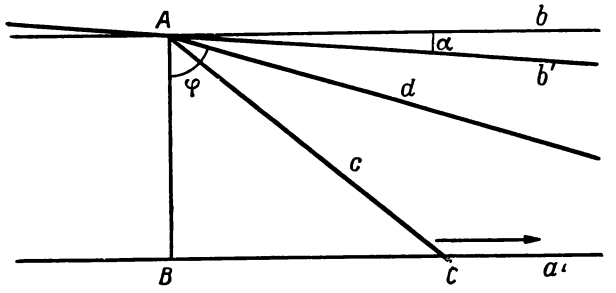


Рис. 3.

Однак подумаємо ще. Проведемо з точки A промінь d під кутом $\omega < 90°$ до прямої AB. Якщо цей кут φ малий, прямі d і a перетнуться на рисунку. Треба тільки продовжити промінь. Якщо ж тепер збільшити кут φ, прямі d і a перетнуться вже не на рисунку, а десь поза книгою. Ще трохи збільшимо кут φ. Тоді при продовженні прямі d і a перетинатимуться далі, скажімо, на відстані кількох сотень метрів. Ясно, що практично переконатися в цьому дуже важко, майже неможливо, але принципіально мислимо.

Тепер ще збільшимо кут φ. Нехай він відрізняється від кута в 90°, припустимо, на одну мільйонну частину градуса. Що ж тепер можна сказати про перетин прямих d і a? Хочеться знову їх мислено продовжити. Але чи так добре ми уявляємо це продовження? Чи не втрачає змісту цей мислений експеримент? Адже продовжувати прямі доведеться туди, куди не вдавалося заглянути навіть за допомогою найпотужніших телескопів.

Припущення ж про те, що промені світла a і d перетнуться за межами видимості найпотужніших телескопів, уже грунтуються на чистій фантазії. Адже невідомо, як поводитимуться там промені світла. Тут вже немає ніяких підстав посилатися на експеримент.

Отже, наш мислений експеримент не привів ні до якого результату,— можливо, при будь-якій відмінності кута φ від 90° прямі a і d перетинаються, але, можливо, є такий маленький кут α, що ці прямі ніколи не перетнуться, хоч би як довго ми їх продовжували. Аксіома про паралельність зовсім не так уже й очевидна.

Звичайно, неочевидність якого-небудь твердження ні в якій мірі не означає його несправедливості. Адже теорема Піфагора, наприклад, теж не така вже очевидна: зовсім не відразу можна повірити в те, що площа квадрата, побудованого на гіпотенузі б у д ь - я к о г о прямокутного трикутника, дорівнює сумі площ квадратів, побудованих на його катетах. Щоб переконатися в справедливості теореми Піфагора для будь-якого прямокутного трикутника, її доводять. Доведення це знову-таки грунтується на тих же аксіомах.

Можливо, що аналогічне становище маємо і в тому випадку, до якого стосується наше запитання. Інакше кажучи, виникає запитання, чи можна довести, виходячи з решти аксіом, таке твердження:

(А). *Через точку поза прямою не можна провести більше однієї прямої, паралельної даній.*

Можливо, що ще Евклід ставив перед собою це запитання, проте відповіді на нього у Евкліда немає. Але через те що цим твердженням (або рівносильним йому) доводилося користуватися при доведенні інших теорем, твердження (А) прийняли за аксіому[1]. У шкільному підручнику геометрії твердження (А) названо аксіомою про паралельні. Отже, довелося прийняти нову аксіому, хоч, як пояснювалося вище, вона далеко не очевидна.

СПРОБИ ДОВЕСТИ АКСІОМУ ПРО ПАРАЛЕЛЬНІ

Після Евкліда багато математиків протягом двох тисячоліть намагалися довести аксіому про паралельні, вивести її, виходячи з решти аксіом евклідової геометрії. Ці доведення провадилися методом від супротивного. Міркували приблизно так. Припустимо, що аксіома про паралельні невірна. Це значить, що через точку A поза прямою a можна провести хоч би дві прямі, які не перетинають a. Спробуємо звести це твердження до абсурду, до суперечності з іншими аксіомами. Якщо таку суперечність виявити вдасться, це означатиме, що наше припущення неправильне, що правильна аксіома про паралельні, тобто вона є теоремою, що виводиться з інших аксіом.

Однак хоч які дотепні були міркування, суперечність виявити не вдавалося. Багатьом вдавалося, відкидаючи аксіому про паралельні, діставати твердження, які здавалися абсурдними. Наприклад, виявилося, що коли аксіома про паралельні невірна, то сума кутів трикутника не дорівнює 180°, геометричне місце точок, рівновіддалених від даної прямої, не є прямою лінією, не існує подібних трикутників, невірна теорема Піфагора і т. д. Дістаючи такі дивні результати, які здавалися абсурдними, багато математиків вважало, що цим вони довели аксіому про паралельні. Але всі ці дивні факти зовсім не свідчили про логічну суперечність. Вони суперечили звичкам, які склалися, але не суперечили один одному.

Однак звички, які склалися, є результатом численних дослідів. Кожен з цих дослідів проводили з деякими помилками у вимірюванні. Виникло запитання, чи не можна, провівши дуже точні досліди, переконатися в справедливості або помилковості вказаних «дивних» тверджень. Виявилося, що і це не так просто. Наприклад, як ми зараз побачимо, не так уже просто дізнатися, чи дорівнює сума кутів трикутника 180°.

ЧИ ДОРІВНЮЄ СУМА КУТІВ ТРИКУТНИКА 180°

Залишимо поки що осторонь питання про те, чи включати аксіому (А) до числа аксіом геометрії.

Вкажемо лише, що з допомогою аксіоми (А) в шкільному підручнику доводять теорему:

(В). *Сума внутрішніх кутів будь-якого трикутника дорівнює* 180° *(або* π *радіанів).*

Трохи складніше довести обернену теорему:

Якщо сума внутрішніх кутів хоч би одного трикутника точно дорівнює 180°, то справедлива аксіома про паралельні, тобто через точку A не можна провести в площині дві прямі, які не перетинають дану пряму a, що лежить у тій же площині[1].

Таким чином, з аксіоми про паралельні виходить, що сума внутрішніх кутів будь-якого трикутника дорівнює 180°; навпаки, з того, що сума кутів деякого трикутника дорівнює 180°, виходить аксіома (А).

Значить, з списку аксіом евклідової геометрії можна було б викреслити аксіому про паралельні, але замість неї внести до списку аксіом твердження (В). При цьому всі інші теореми евклідової геометрії залишилися б незмінними.

Ми вище пояснили трудність (навіть практичну неможливість) експериментальної перевірки аксіоми про паралельні з допомогою світлових променів: коли б навіть можна було виділити як завгодно тонкий пучок світлових променів і коли б не було ніякого поглинання світлових променів, то й тоді абсолютно невідомою залишалася б їх поведінка за межами видимості в сучасні телескопи. Завжди неясним залишалося б питання про те, чи перетнуться промені d і a, якщо кут φ близький до 90°.

Прийнявши аксіому (А), ми дістанемо геометрію, в якій сума кутів будь-якого трикутника дорівнює 180°. Прийнявши твердження,

---

[1] Евклід як аксіому прийняв інше твердження, але воно рівносильне твердженню (А).

[1] Доведення цієї теореми в шкільному підручнику не наводиться. Його можна знайти, наприклад, у книзі М. В. Єфімова «Вища геометрія».

протилежне аксіомі (А), ми дістанемо геометрію, в якій сума кутів всякого трикутника відмінна від 180°. Як же тут бути? Приймати чи не приймати аксіому (А)?

Зважаючи на надзвичайні труднощі, зв'язані з експериментальною перевіркою аксіоми (А) в дослідах з світловими променями, виникає питання, чи не простіше на таких дослідах перевірити твердження (В).

Пояснимо докладніше ситуацію, що тут виникає.

Як нам уже відомо, ніколи в природі не трапляються точки, прямі і площини. Отже, в природі не буває і відрізків, кутів, трикутників. Ми постійно спостерігаємо лише кульки, «снопики» променів тощо, які з певним наближенням вважаємо точками, прямими тощо. В геометрії ж точки, прямі, відрізки, кути і т. п. є абстрактними поняттями, які виникли в результаті тривалого спостереження саме за кульками, «снопиками», туго натягнутими нитками тощо. Всі висновки і теореми геометрії застосовні до вивчення реальних об'єктів лише у тій мірі, в якій ці об'єкти приймаються в кожному конкретному випадку за точки, прямі, площини, тобто з деяким наближенням.

Уявімо собі, що ми спостерігаємо в телескоп яку-небудь зорю. Нехай зорю ми бачимо як точку. Звичайно, таке припущення залежить від точності наших спостережень, від якості телескопа, розмірів зорі та її відстані до спостерігача. Насправді ця зоря дуже великих розмірів, але її відстань до спостерігача надто велика. Її зображення в окулярі ми вважаємо «точкою». Коли б зоря наблизилась до спостерігача, її зображення в окулярі збільшилося б і спостерігач уже не вважав би її точкою. Коли б зоря ще більше віддалилася від спостерігача, він просто перестав би її бачити.

При цьому спостерігач вважає, що світло від зорі, яке потрапляє на сітчатку його ока, йде по прямій. Ця «пряма» у дійсності являє собою «сніп», дуже вузький поблизу спостерігача, але надто широкий поблизу зорі, де його товщина дорівнює діаметру зорі. При всіх цих обставинах спостерігач вважає, що він має справу з прямою, яка проходить через дві точки, однією з яких є зоря, а другою — її зображення в окулярі телескопа.

Таке саме становище маємо не тільки в астрономічних, а й у земних спостереженнях. Уявімо собі, що на місцевості (рис. 4) провадяться геодезичні роботи. Нехай у пункті B на штативі укріплено кульку, яку геодезист спостерігає в звичайний теодоліт, установлений у пункті A.

Якої ж величини треба взяти кульку в пункті B для цих спостережень? Кульку треба вибрати так, щоб її зображення утворилося з можливою точністю в центрі окуляра теодоліта. Якщо ж її зображення буде великим кружком, кульку треба зменшити для точнішої наводки. Але зменшувати кульку є рація лише доти, поки це зменшення позначатиметься на точності наводки теодоліта. Вибравши кульку належного розміру, геодезист вважає, що він має справу з «точками» A і B, сполученими відрізком AB. При цьому, як і в прикладі із зорею, кулька B може насправді бути досить великою (це залежить, звісно, від відстані AB).

Тепер уявімо собі, що в пункті C також встановлено на штативі кульку належних розмірів. Наводячи теодоліт по черзі на куль-

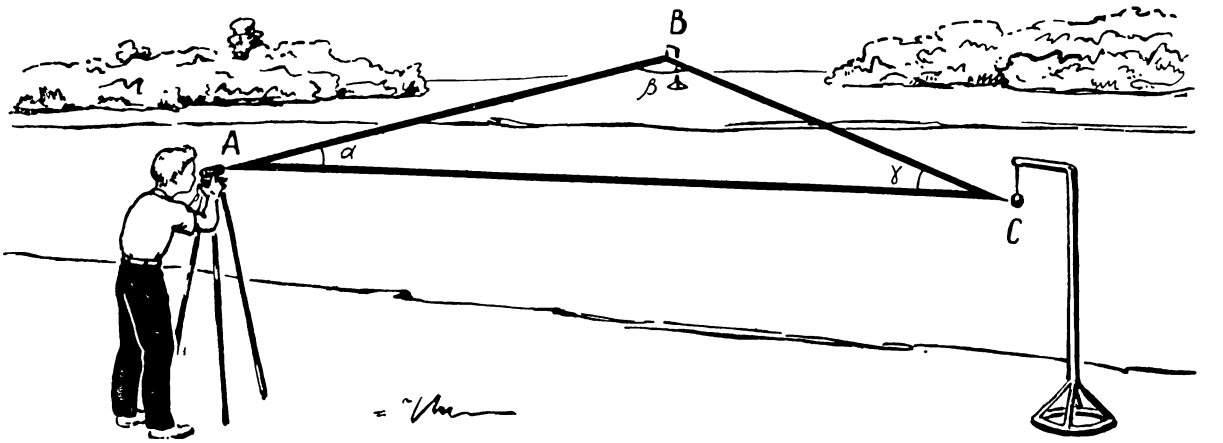


Рис. 4. Геодезичне знімання місцевості.

ки B і C, геодезист знаходить величину α, яка дорівнює різниці відліків на лімбі теодоліта.

У геодезичних роботах неможливо все виміряти безпосередньо (на рис. 4, наприклад, ріка перешкоджає виміряти відстань AB), тому деякі величини визначають не вимірюванням, а розрахунком, що грунтується на використанні даних, знайдених безпосереднім вимірюванням. Для розрахунку застосовують формули і теореми, що їх дає геометрична теорія.

Однак, як зазначалося вище, геометрія оперує абстрактними поняттями точки, прямої, трикутника і т. д. Тому наш геодезист, виконавши цілком конкретний фізичний експеримент з кульками і «снопиками» світлових променів, розглядає а б с т р а к т н и й геометричний трикутник ABC і вважає, що величина геометричного кута у вершині A дорівнює α — різниці відліків на лімбі теодоліта.

Зрозуміло, що величина α залежить від того, наскільки добрим і досконалим був застосований теодоліт. Тому, застосовуючи різні вимірювальні прилади, геодезист повинен був би щоразу вивчати дещо інший абстрактний трикутник ABC.

Уявімо собі для певності, що конструкція теодоліта не дає можливості фіксувати на лімбі покази, менші $10'$. В такому разі, виконавши відлік на лімбі після наведення на кульку B, кажуть, що відлік зроблено з точністю до $10'$. Те саме стосується і наводки теодоліта на кульку C.

Знайшовши різницю відліків α, геодезист вважає, що значення кута A в абстрактному трикутнику ABC відрізняється від α не більш як на $\pm 20'$. Застосувавши точніші прилади, він міг би дістати для кута A інше значення, яке лежить, однак, у межах від $\alpha - 20'$ до $\alpha + 20'$.

Аналогічно можна дістати для кутів B і C величини β і γ та знайти суму $\sigma = \alpha + \beta + \gamma$.

Постає питання: чи дорівнює ця сума 180°? Взагалі кажучи, ні. Зрозуміло, що такий збіг малоймовірний. Пригадаємо насамперед, що кожна наводка теодоліта виконувалася з точністю до $10'$. Для визначення σ теодоліт довелося наводити шість раз. Тому, застосувавши точніший прилад, можна було б дістати іншу суму, яка, проте, не виходила б за межі проміжку від $\sigma - 1°$ до $\sigma + 1°$.

Отже, вибір суми кутів розглядуваного абстрактного трикутника залежить від точності проведених вимірювань (у даному разі від точності застосованого теодоліта). В нашому випадку геодезист має право розглянути абстрактний трикутник, сума кутів якого відрізняється від знайденої при вимірюванні величини σ, але не більш як на 1°.

Тут постає інше питання: наскільки виміряна сума кутів σ відрізняється від 180°? Чи перевищує ця різниця 1°? Чи міститься різниця між 180° і σ в межах точності застосованих інструментів? Інакше кажучи, чи може геодезист в даному разі розглядати абстрактний трикутник з сумою кутів 180°? Проаналізуємо можливі результати вимірювання. Тут є дві можливості.

П е р ш а м о ж л и в і с т ь: в результаті вимірювання дістали $\sigma = \alpha + \beta + \gamma$, причому різниця $|\sigma - 180°|$ перевищує точність проведених вимірювань (в даному разі 1°). У цьому випадку геодезист повинен міркувати приблизно так. Ріка перешкоджає виміряти відстань AB (див. рис. 4). Ще важче безпосереднім вимірюванням визначити площу трикутника ABC. Для знаходження цих величин потрібні деякі геометричні теореми, що пов'язують невідомі елементи трикутника з тими, величина яких визначається з дослідних даних. Отже, треба побудувати таку геометрію, висновки якої давали б можливість з потрібною точністю розв'язувати багато практичних задач, подібних до тієї, що тут зустрілася.

Ми вже почали будувати таку геометрію на базі деякої системи аксіом. Трудність виникла у питанні, чи включати до них аксіому (А). Коли б ми прийняли цю аксіому, в нашій геометрії сума кутів всякого трикутника дорівнювала б 180°. Але проведений дослід показує, що прийнята точність вимірювання не узгоджується з таким висновком. Це значить, що така геометрія для нашого геодезиста не досить добра. Висновки такої геометрії наш геодезист не зміг би застосовувати в своїй практиці. Знаючи довжину AC, кути β і γ, він не зміг би з потрібною точністю за відомою теоремою синусів визначити довжину AB, бо теорема синусів справедлива лише там, де сума кутів трикутника дорівнює 180°. Так само він не зміг би з бажаною точністю за відомими з шкільного курсу формулами знайти площу трикутника.

Йому довелося б для практичних потреб будувати геометрію, де аксіома (А) несправедлива і, отже, сума кутів трикутника не дорівнює 180°.

Д р у г а м о ж л и в і с т ь: сума кутів $\sigma = \alpha + \beta + \gamma$, знайдена в результаті вимірювання, відрізняється від 180° на величину,

що не перевищує точності вимірювань (в даному разі 1°).

У цьому випадку геодезистові для практичних потреб цілком підходить геометрія, в якій сума кутів трикутника дорівнює 180°. У нього немає ніяких підстав відкидати аксіому (А), а також і твердження (В). Звичайна евклідова «шкільна» геометрія тут виявляється дуже корисною, її висновки набувають великого практичного значення з точністю, прийнятою у вимірюваннях нашого геодезиста.

Однак треба зауважити, що геодезист і в цьому разі не повинен надто зневажливо ставитися до геометрії, де невірна аксіома (А) і де сума кутів трикутника відмінна від 180°. Не виключена можливість, що і така «дивна» геометрія в майбутньому буде йому корисною. Якщо всі вимірювання геодезиста поки що добре узгоджувалися з такою геометрією, де сума кутів трикутника дорівнює 180°, то, можливо, у дальшому, збільшивши точність приладів або вимірюючи кути значно більших, космічних трикутників, він натрапить на те, що при нових вимірюваннях звичайна геометрія вже не описуватиме світ з достатньою точністю. І тоді потрібна буде зовсім інша геометрія.

Підведемо деякі підсумки. Коли б в якихнебудь дослідах дістали перший результат, це означало б, що геометрія, побудована з допомогою аксіоми (А), не задовольняє наші потреби, що вона не досить добра. Треба будувати іншу геометрію, де аксіома (А) несправедлива.

Якщо ж у дослідах завжди дістаємо другий результат, то це означає тільки, що евклідова геометрія з аксіомою (А) *поки що* нас цілком задовольняє. Але з часом, із збільшенням точності спостережень, можливо, потрібна буде і інша геометрія. Отже, питання полягає лише в тому, яка геометрія з більшою точністю описує реальний світ.

Цілком володіючи викладеними ідеями, видатний математик М. І. Лобачевський вже в першій половині XIX ст. наявними на той час астрономічними засобами виміряв суму кутів дуже великого космічного трикутника. За вершини були взяті дві найвіддаленіші точки на еліптичній орбіті Землі і одна з далеких зір.

Як і слід було чекати, в результаті вимірювання він дістав величину, відмінну від 180°, однак ця відмінність не виходила за межі точності застосованих інструментів. Отже, питання про те, яка геометрія точніше описує реальний світ, залишилося відкритим. Було неясно, чи потрібна буде взагалі яка-небудь геометрія, в якій несправедлива аксіома (А). Чи не є така геометрія марним плодом фантазії?

ГЕОМЕТРІЯ ЛОБАЧЕВСЬКОГО

М. І. Лобачевський у 1826 р. вперше побудував і розвинув одну з можливих геометрій, де аксіома (А) несправедлива[1]. Геометрія Лобачевського грунтується на тих же аксіомах, що й евклідова геометрія, крім аксіоми про паралельні, яка замінюється протилежним твердженням — аксіомою Лобачевського:

Через точку поза прямою в даній площині можна провести хоч би дві прямі, які не перетинають даної прямої.

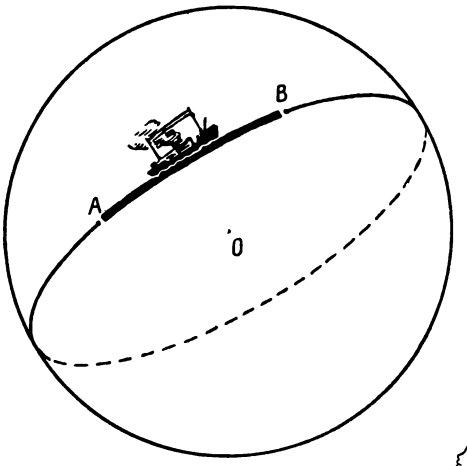
Ми бачили, що питання про те, яка геометрія — Евкліда чи Лобачевського — точніше описує світ світлових променів, вирішується не так вже просто, хоч аксіома Лобачевського і здається на перший погляд парадоксальною. Величезною заслугою Лобачевського було те, що він це питання поставив. Але його ідеї були такі незвичні, що сучасники їх не зрозуміли.

ГЕОМЕТРІЯ КРИВИХ ПОВЕРХОНЬ

Багато що в геометрії Лобачевського стало яснішим, коли вчені добре ознайомилися з геометрією кривих поверхонь. Щоб пояснити, в чому тут справа, розглянемо геометрію на кулі. Був час, коли люди думали, що Земля плоска. Пізніше, спостерігаючи за кораблями, які ховалися за горизонтом, вони прийшли до висновку про кулястість Землі. Але для цього їм довелося розглядати предмети (кораблі), що мають певну висоту, підносяться над поверхнею Землі. Постає питання, чи не можна переконатися в кулястості Землі, проводячи вимірювання безпосередньо на земній поверхні, не піднімаючись над цією поверхнею і не розглядаючи предметів, розташованих над поверхнею Землі.

Звичайно, це легко зробити — адже якщо рухатися по Землі в одному й тому ж напрямі, то кінець кінцем ми повернемося на те місце, з якого вийшли. Але для такої перевірки треба зробити цілу мандрівку навколо світу. А чи не можна переконатися в кулястості Землі, за-

[1] Докладно про життя і діяльність цього видатного вченого і громадянина можна прочитати в книзі В. Ф. Кагана «Лобачевский».



Геодезичними лініями на сфері є дуги великого круга. Геометрія, в якій за прямі приймаються дуги великого круга, називається сферичною геометрією.

лишаючись весь час на невеликій її ділянці, скажімо, на острові? Виявляється, можна. Для цього треба вимірювати геометричні фігури на поверхні Землі. Візьмемо на цій поверхні дві точки — A і B. Ці точки можна сполучити найрізноманітнішими лініями, не залишаючи нашого острова. Серед усіх ліній, що сполучають точки A і B, буде одна, яка має найменшу довжину. Знаючи, що Земля куляста, ми можемо сказати, що́ це за лінія,— це дуга великого круга, яка сполучає точки A і B. А ось людина, що живе на острові і не знає про кулястість Землі, назве цю лінію прямою, що сполучає точки A і B. Після цього вона візьме три точки A, B, C і виміряє кути трикутника ABC. Якщо острів дуже маленький і точність інструментів теж мала, то ця людина дістане, що сума кутів даного трикутника дорівнює 180°. Зовсім інший результат буде, якщо острів великий або якщо інструменти у мешканця цього острова дуже точні.

Щоб зрозуміти, в чому справа, розглянемо такі три точки: за точку A виберемо Північний полюс, за точку B — перетин екватора з нульовим меридіаном і за точку C — перетин екватора з меридіаном, що має довготу 90°. Якщо ви візьмете ці три точки на глобусі, то відразу побачите, що всі три кути трикутника ABC дорівнюють 90°. Але ж тоді сума всіх кутів цього трикутника дорівнює 270°. Можна довести, що в будь-якого трикутника на поверхні кулі сума кутів більша за 180°, і цей надлишок тим більший, чим більша площа трикутника (ось чому для маленьких трикутників сума кутів майже дорівнює 180°).

Отже, точно вимірюючи кути великого трикутника, можна переконатися, що ми живемо не на площині, а на викривленій поверхні. З допомогою ще́ точніших вимірювань можна дістати уявлення і про форму поверхні.

Вимірювання, проведені на кулі, можна виконувати на будь-якій іншій поверхні. На перший-ліпшій поверхні є лінії, які сполучають дві точки і мають меншу довжину, ніж усі інші лінії, що сполучають ці точки. Такі лінії називають г е о д е з и ч н и м и. Вимірюючи кути трикутників, утворених геодезичними лініями, можна робити висновок про ступінь викривленості поверхні. У деяких кривих поверхонь (таких, як куля, еліпсоїд) ця сума буде більша 180°. В інших, наприклад у сідла,— менша 180°. А є поверхні, у яких в деяких місцях сума кутів більша 180°, а в інших — менша 180°. Але чим більше відрізнятиметься ця сума від 180°, тим сильніше буде викривлений вимірюваний трикутник. Є така поверхня (її називають псевдосферою), на якій геодезичні лінії поводять себе так само, як прямі на площині Лобачевського.

Відомий німецький учений Б. Ріман ввів дуже важливе поняття, показавши, що можна розглядати не тільки викривлені поверхні, а й викривлені простори. Викривлений простір дуже важко собі уявити — адже коли ми говоримо́ про криву поверхню, то уявляємо собі, що ця поверхня лежить в якомусь просторі. А де ж лежить кривий простір? Справа в тому, що у викривленості поверхні можна переконатися, не виходячи за її межі, а вимірюючи кути в трикутниках на цій поверхні. Так само простір слід вважати викривленим, якщо сума кутів трикутників, взятих у цьому просторі, відрізняється від 180°.

ЯКА Ж ГЕОМЕТРІЯ НАШОГО СВІТУ

Ми розповіли про різні геометрії. Природно, постає питання: яка ж геометрія нашого світу? Це питання зводиться до такого: чи викривлений наш простір, чи ні? Щоб чітко поставити це питання, треба ще сказати, які лінії в просторі ми вважатимемо прямими. Пригадаймо, що ми створили поняття прямої лінії, розглядаючи світлові промені в пустоті.

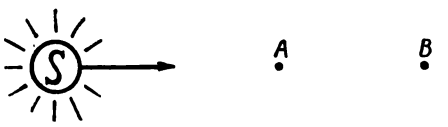


Рис. 5. Сонце рухається в напрямі до зір A і B.

Тому і зараз ми назвемо прямою, що сполучає дві точки, світловий промінь, який іде в пустоті з однієї точки в іншу.

Тепер питання про те, яка геометрія нашого простору, стало цілком певним. Візьмемо в просторі три точки A, B і C та розглянемо трикутник, утворений світловими променями, які сполучають ці точки. Чи буде сума кутів цього трикутника дорівнювати 180°? Відповідь на це питання дав видатний фізик XX ст. А. Ейнштейн. Він створив теорію відносності, яка підтвердила викривленість нашого простору. За теорією Ейнштейна, матеріальні маси викривляють простір, що оточує їх. Теорія відносності дістала блискуче підтвердження на одному досліді, про який ми зараз розповімо. Цей дослід не раз повторювали астрономи, і він показав добрий збіг з раніше одержаними висновками теорії відносності.

Уявімо собі на Землі спостерігача, який у певний момент бачить зорі A і B та поблизу від зорі A Сонце S (рис. 5), яке рухається «по небу» в напрямі, вказаному стрілкою[1]. Спостереження проводиться в невеликий проміжок часу, так що зорі A і B можна вважати нерухомими (їх переміщення за цей час настільки незначне, що його не можна виявити навіть найточнішим інструментом).

Неважко виміряти швидкість пересування Сонця по небу. В малий проміжок часу вона стала. Знаючи цю швидкість і відстань між Сонцем та зорею A, неважко підрахувати, в який момент часу Сонце закриє цю зорю.

Проте точний дослід показує, що насправді зоря A закривається Сонцем з деяким запізненням, трохи пізніше від розрахованого часу. Зорю A ще видно в той момент, коли за розрахунком Сонце повинно було б її вже закрити. Це явище передбачено теорією відносності, лише потім його вдалося виявити експериментально.

Як же це пояснює теорія відносності? Виявляється, що сильне поле тяжіння, утворене Сонцем, викривляє простір навколо нього і змінює напрям світлового променя.

Пояснимо це докладніше. У початковий момент часу (рис. 6, *I*) Сонце не впливає на шлях світлових променів, що йдуть від зорі A, бо вони далекі від Сонця. Промінь a попадає в

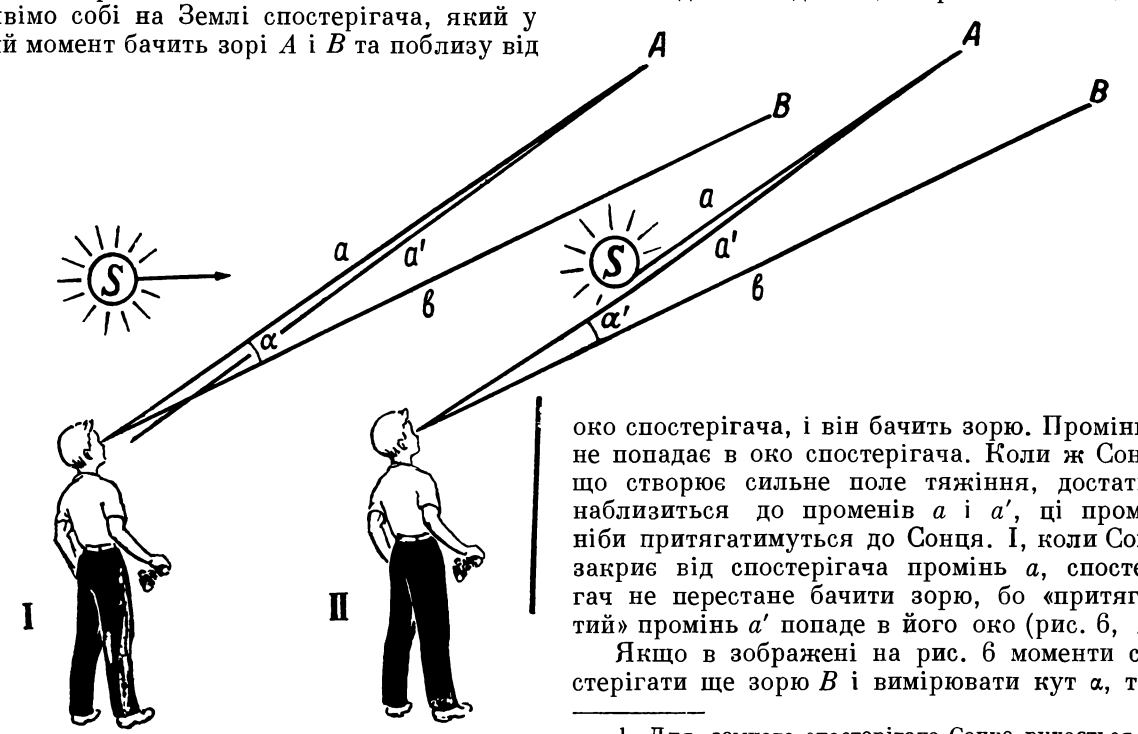


Рис. 6. Зорю A ще видно, хоч за розрахунками вона мав бути закрита Сонцем.

око спостерігача, і він бачить зорю. Промінь a' не попадає в око спостерігача. Коли ж Сонце, що створює сильне поле тяжіння, достатньо наблизиться до променів a і a', ці промені ніби притягатимуться до Сонця. І, коли Сонце закриє від спостерігача промінь a, спостерігач не перестане бачити зорю, бо «притягнутий» промінь a' попаде в його око (рис. 6, *II*).

Якщо в зображені на рис. 6 моменти спостерігати ще зорю B і вимірювати кут α, то у

[1] Для земного спостерігача Сонце рухається «по небу». Крім того, зауважимо, що цей дослід ставився при повному сонячному затемненні.

другому випадку він буде менший, ніж у першому,бо в першому випадку це кут між променями a і b, а в другому — між a' і b.

Чи можна сказати, що промінь a' спочатку був прямим, а потім (внаслідок тяжіння Сонця) відхилився від прямолінійного шляху, викривився? Ні, не можна. Адже ми назвали прямими саме промені світла в пустоті. Які властивості променів світла — такі властивості прямих. Промінь a' і в перший, і в другий момент залишався прямим.

Отже, справа не в тому, що промінь світла викривився, а в тому, що простір навколо Сонця під дією тяжіння Сонця набув нових властивостей, викривився. Викривляють простір і інші зорі. Та й маленькі тіла теж впливають на хід світлових променів, тільки, звичайно, набагато менше, ніж зорі.

Але всі тіла в природі перебувають у безперестанному русі. Тому тіло, яке викривляло в один момент простір в одному місці, через деякий час викривляє його в іншому місці. Тому в різні моменти світлові промені поводять себе по-різному, і геометрії, які описують їх поведінку в ці моменти, будуть різні. Отже, геометрія, яка описує з певною точністю наш реальний простір (геометрія світлових променів), не лишається незмінною, а змінюється з часом. Значить, у формулюванні аксіом повинен брати участь час. Звідси поняття простору і часу невіддільні, нерозривні.

Таким чином, питання про геометрію нашого простору в цілому дуже складне. Практично важливо знати, яка геометрія з тією чи іншою точністю придатна для опису реального світу.

У цьому розумінні природно ставити питання про геометрію тієї чи іншої «частини» реального світу.

Вище пояснювалося, що, навіть залишаючись в обмеженій «частині» свого світу, його мешканці, удосконалюючи техніку спостережень, збільшуючи їх точність, можуть прийти до висновку, що геометрія, яку вони застосовували раніше, вже не досить добра і її треба замінити новою. Відкриваючи нові фізичні закони, уточняючи їх, вони змушені також уточняти і застосовувану ними геометрію. Ми бачили вище, що ця «місцева» геометрія залежить від сил тяжіння, а отже, від розподілу матерії в розглядуваній частині простору.

Отже, дослідження космічних питань привело до висновку про неевклідовість нашого простору світлових променів.

Зрозуміло, що й при розгляді найзвичайнісіньких земних питань залежність простору від часу збережеться, простір залишатиметься неевклідовим, але ця неевклідовість буде настільки незначною, що нею цілком можна (і треба!) знехтувати. Цю неевклідовість навіть не зможуть виявити наші інструменти, як не могла людина на маленькому острівці виявити викривленість Землі.

Дві прямовисні прямі перетинаються в центрі Землі.

Евклідова геометрія зберігає своє повне значення у питаннях практики, інженерної техніки тощо. Смішний був би, наприклад, інженер, який почав би враховувати, що дві вертикальні лінії виска не паралельні, а перетинаються в центрі Землі. Ще менше підстав у інженера припускати, що в побудованому трикутнику сума кутів відмінна від двох прямих.

Евклідова геометрія в таких питаннях з великою точністю описує наш реальний світ, і не випадково вивчення властивостей простору люди почали саме з евклідової геометрії.

Зрозуміло, що все це ні в якій мірі не применшує важливості неевклідових геометрій. Вони знаходять собі застосування у найважливіших теоретичних і практичних питаннях сучасної фізики та математики.

ВИСНОВОК

Геометрія Евкліда служить людині в багатьох галузях її діяльності. Проте, розширюючи її сферу, людина неминуче приходить до вивчення неевклідової геометрії. Вперше цей висновок зробив Лобачевський. Багатовікова звичка до понять евклідової геометрії не дала змоги навіть видатним математикам, сучасникам Лобачевського, зрозуміти його ідеї. Тріумф цих ідей настав пізніше. Тепер відкриття Лобачевського міцно ввійшли в науку про природу і добре відомі кожному фізикові та математикові.

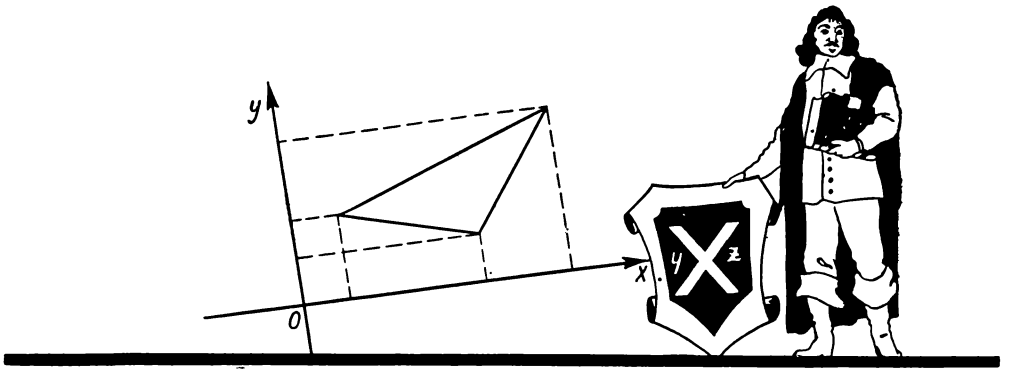
На стор. 109 говорилося про те, що під точкою, прямою і площиною в геометрії розумі-

ють абстрактні поняття, які мають властивості, перелічувані в аксіомах.

Аксіоми ж, про які йшла мова вище, вибирали так, щоб вони з потрібною точністю характеризували поведінку пучків світлових променів у нашому реальному фізичному просторі.

Цим установлюється тісний зв'язок між геометрією і фізичними явищами, що відбуваються в реальному світі. При цьому слід мати на увазі, що геометрія застосовна не тільки до вивчення явищ, зв'язаних з поширенням світла. Можна розглянути і які-небудь інші фізичні об'єкти, що не мають ніякого відношення до поширення світла. Деякі з цих об'єктів можна прийняти за еталон прямизни подібно до того, як це робилося вище з вузькими «снопиками» світлових променів. Можна, наприклад, як еталон прямизни прийняти траєкторії твердих тіл досить малого розміру, що рухаються за інерцією, тобто при відсутності впливу на ці тіла зовнішніх тіл.

Ця геометрія (як і геометрія, одержана вище при розгляді світлових променів) буде лише в першому наближенні будуватися на аксіомах Евкліда.



Рівняння і функції

ЯК ЛЮДИ ВЧИЛИСЯ РОЗВ'ЯЗУВАТИ РІВНЯННЯ

Від періоду між кінцем другого тисячоліття і початком нашого літочислення історія зберегла одну з найстародавніших письмових пам'яток математики — «Порадник, як досягти знання всіх темних (важких) речей... всіх таємниць, які приховують у собі речі... писець Ахмес написав це... з старих рукописів...» (частина заголовка відірвана). Це — єгипетський збірник задач, який має назву «Папірус Ахмеса» (іноді його називають і «Папірусом Райнда» за ім'ям англійського збирача старожитностей, який придбав цей документ в середині минулого століття).

У папірусі Ахмеса є ряд задач, які ми розв'язуємо з допомогою рівнянь першого степеня. Єгипетський автор розв'язує їх способом, який протягом кількох тисячоліть застосовувався різними народами для розв'язування таких задач і який називається «методом хибного положення».

Це і є той метод припущення, який на уроках арифметики застосовується і тепер.

Єгиптяни за 2000 років до н. е. мали для позначення невідомого спеціальний символ і назву; остання вимовляється «хау» або «аха» та умовно перекладається словом «купа».

Ось одна із задач папіруса Ахмеса.

«Купа. Її сьома частина, її ціле. Що становить 19». Це значить: треба знайти число, яке, будучи додане до його сьомої частини,

дасть у сумі 19. Інакше кажучи, треба розв'язати таке рівняння:

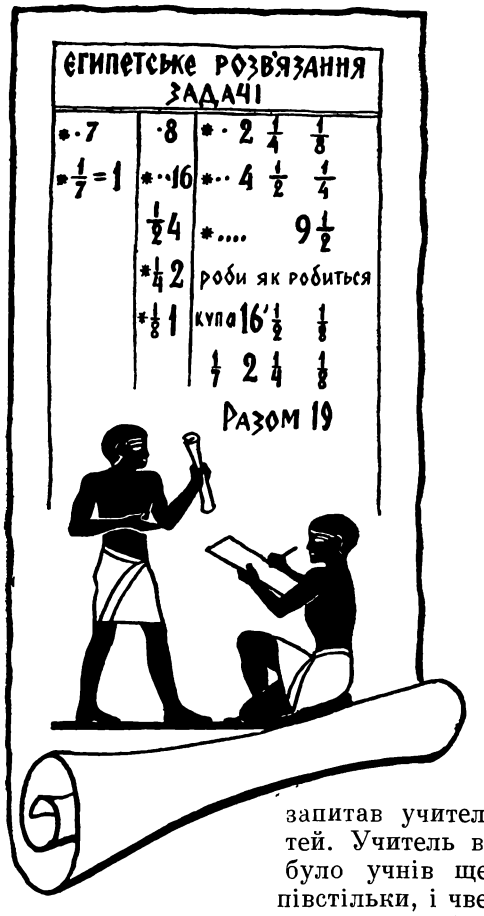
$$x + \frac{x}{7} = 19.$$

На рисунку зображене єгипетське розв'язання задачі.

Смисл цього розв'язання такий.

Припустимо, що «купа» є 7; тоді $\frac{1}{7}$ буде 1 (див. перший стовпчик). Зірочки означають, що ці числа відповідають змісту задачі.

При зробленому припущенні права частина розв'язуваного рівняння дорівнювала б восьми (7 + 1), тому у другому стовпчику стоїть число 8. Воно менше від того числа, яке вимагається задачею, тобто 19. Автор у думці подвоює його і дістає 16. Дальше подвоювання дало б 32, але це перевищує число 19, яке вимагається задачею, і тому число 16 в розв'язанні позначається зірочкою як таке, що повинно ввійти в шуканий розв'язок. Не вистачає ще 19 — 16 = 3. Автор пробує взяти $\frac{1}{2}$ від 8, тобто 4. Ця частка припущеного числа не може ввійти в шуканий розв'язок, бо треба додати лише 3. Тоді той, хто розв'язує задачу, бере $\frac{1}{4}$ і $\frac{1}{8}$ від 8, тобто 2 і 1, та позначає їх зірочками як такі, що становлять разом з 16 число 19.



Отже, автор встановив у другому стовпчику розв'язання, що припущене спочатку значення для «купи» треба взяти $2 + \frac{1}{4} + \frac{1}{8}$ раз, щоб задовольнити умову задачі. Залишається 7 помножити на $2 + \frac{1}{4} + \frac{1}{8}$ (єгиптяни, як і багато інших народів, знака «плюс» при додаванні не ставили; ми теж у мішаних числах пишемо $3\frac{1}{4}$ замість $3 + \frac{1}{4}$). Автор розв'язання замість множення 7 на $2\frac{1}{4}\frac{1}{8}$ множить $2\frac{1}{4}\frac{1}{8}$ на 7. Для цього в третьому стовпчику він записує число $2\frac{1}{4}\frac{1}{8}$, потім подвоєне (..) і почетверене (....) значення його. Ці три числа додають, і виходить для «купи» значення $16\frac{1}{2}\frac{1}{8}$. До нього додають $\frac{1}{7}$ «купи», тобто $2\frac{1}{4}\frac{1}{8}$, і це дає в результаті 19.

МЕТОД ДВОХ ХИБНИХ ПОЛОЖЕНЬ

В дальшому у різних народів (у Китаї, Індії) був створений метод двох хибних положень, для якого араби дали правило, що застосовувалося навіть у XVIII ст. (між іншим, його наводить Леонтій Пилипович Магніцький у своїй «Арифметиці»). Ось приклад розв'язування Магніцьким задачі способом двох хибних положень.

З а д а ч а. Батько учня запитав учителя, скільки у того вчиться дітей. Учитель відповів, що коли б у нього було учнів ще стільки, скільки зараз є, і півстільки, і чверть стільки, і син того, хто запитує, то їх було б рівно 100 чоловік.

У нашому розумінні задача зводиться до розв'язання рівняння:

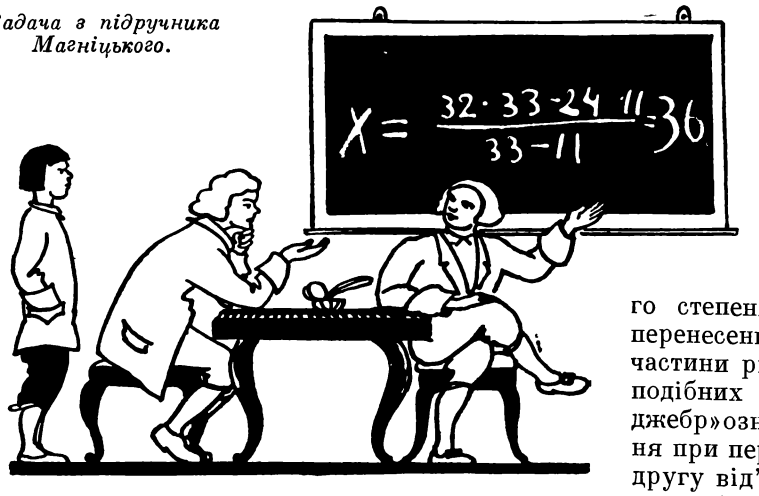
$$x + x + \frac{x}{2} + \frac{x}{4} + 1 = 100.$$

Р о з в ' я з а н н я з а М а г н і ц ь к и м. Припустимо, що учнів було 24. Тоді, згідно з умовою, мали б 24 + 24 + 12 + 6 + 1 = 67, тобто на 100 — 67 = 33 менше від потрібного.

Робимо друге припущення: учнів було 32; тоді 32 + 32 + 16 + 8 + 1 = 89, тобто на 100 — 89 = 11 менше від потрібного. На підставі віками виробленого правила Магніцький указує готовий спосіб знаходження x:

$$x = \frac{32 \cdot 33 - 24 \cdot 11}{33 - 11} = 36.$$

Якщо при одному припущенні вийде більше, а при другому — менше, ніж вимагає умова задачі, то у формулі, за якою обчислюється x, замість знака «мінус», треба поставити знак «плюс». Наприклад, нехай перше при-



Задача з підручника Магніцького.

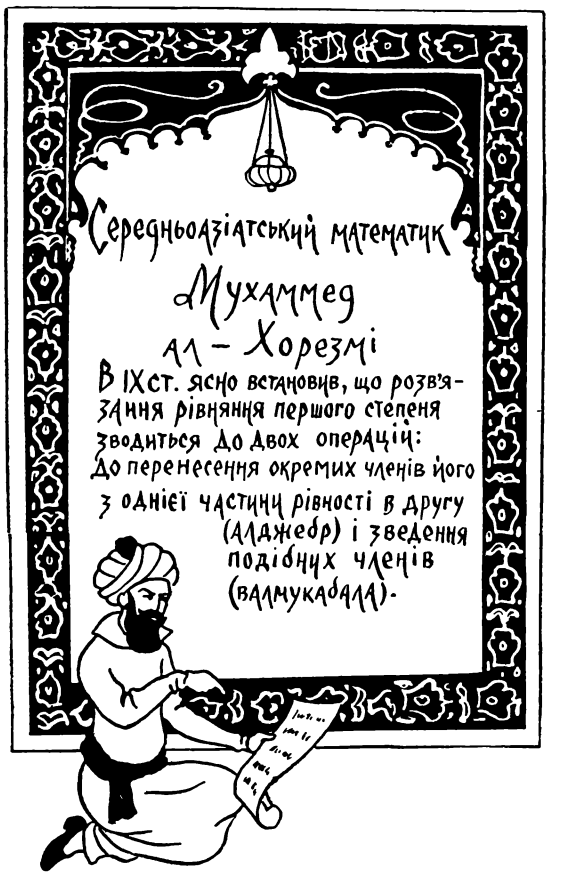
пущення 60. Тоді $60 + 60 + 30 + 15 + 1 = 166$, $166 - 100 = 66$ (надлишок); нехай друге припущення 20. Тоді $20 + 20 + 10 + 5 + 1 = 56$, $100 - 56 = 44$ (недостача). В такому разі:

$$x = \frac{60 \cdot 44 + 20 \cdot 66}{66 + 44} = 36\,[1].$$

ВВЕДЕННЯ ПОНЯТТЯ НЕВІДОМОГО ЧИСЛА

Важливим етапом у розвитку вчення про рівняння є введення поняття невідомого числа і символу для його позначення. Це — «купа» з особливим символом для її позначення в єгиптян і відповідно інші назви та позначення у вавілонян, китайців, індійців, стародавніх греків, таджиків та інших народів. В європейських народів систематичне позначення невідомого числа буквами x, y, z встановлюється в середні віки і остаточно закріплюється в XVI—XVII століттях у працях Вієта та Декарта.

Способи розв'язування рівнянь першого степеня, що грунтуються на властивостях арифметичних дій, розвивалися у різних народів протягом ряду віків. Основними прийомами при цьому були: перенесення членів рівняння з однієї частини рівності в іншу з протилежним знаком і зведення (з'єднання) подібних членів. Перший з цих прийомів потребував поняття від'ємного числа, яке виникло значно пізніше від тієї епохи, коли людина почала розв'язувати задачі, що зводяться до рівняння першого степеня. Внаслідок цього рівнянню надавали такого вигляду, щоб усі його члени були додатними, і давали спеціальні правила для різних видів рівнянь з додатними членами. Середньоазіатський математик Мухаммед ал-Хорезмі в IX ст. ясно встановив, що розв'язання рівняння першого степеня зводиться до двох операцій: до перенесення окремих членів його з однієї частини рівності в другу (алджебр) і зведення подібних членів (валмукабала). Слово «алджебр» означає «відновлення», тобто перетворення при перенесенні з однієї частини рівняння в другу від'ємного члена (який у той час не мав смислу) в число (додатне). Назва «алджебр» (aljebr) перетворилася в слово «алгебра», яке вживається всіма народами. Ал-Хорезмі широко застосовував рівняння для розв'язування практичних задач «різного роду і сорту» (спільним прийомом), що згодом сприяло встановленню у європейських народів поглядів на почат-



[1] Правило, яке застосовується для обчислення x, легко обгрунтувати (див. І. Я. Депман, Розповіді про математику, «Радянська школа», 1955).

кову алгебру як на загальну, або універсальну, арифметику (Ньютон, Ейлер). Для початкової алгебри, що вивчається в школі, цей погляд залишається в силі і в наш час.

З грецьких математиків способами розв'язування рівнянь першого степеня, мабуть, володів Діофант (III ст. н. е.), але частина його книги про розв'язування рівнянь першого степеня до нас не дійшла. Способи запису рівнянь, які для нас здаються природними і простими, остаточно виробились лише в XVII ст. (Вієт, Харріот, Декарт), а знак рівності і дужки ввійшли у загальний вжиток навіть у XVIII ст. Дужки запровадив Ейлер.

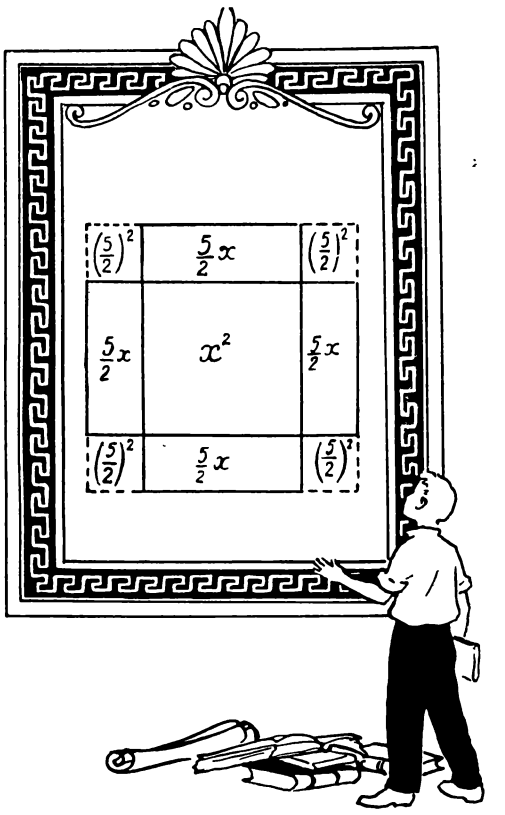
Способи розв'язування систем рівнянь першого степеня з'являються спочатку в Індії, Китаї, в арабських народів; в Європі — з XIII ст. (Леонардо Пізанський — XIII ст., Пачіолі — XV ст., Штіфель — XVI ст.). Спочатку з'явився спосіб додавання і віднімання, а потім і інші (підстановки, конгруенції). У Ньютона в його лекціях, виданих у 1707 р., застосовуються вже всі ці способи.

КВАДРАТНІ РІВНЯННЯ

Рівняння другого степеня вміли розв'язувати ще вавілоняни в другому тисячолітті до н. е., але їх знання в цьому питанні не мали впливу на розвиток європейської науки, так само як і досягнення інших східних народів, що довго залишалися в Європі невідомими. Грецькі математики розв'язували квадратні рівняння геометрично: Евклід — поділом відрізка в середньому і крайньому відношенні; Герон, Діофант — прийомами, які по суті збігалися з нашими способами. Індійські та китайські математики розглядають від'ємні корені квадратного рівняння з перших віків нашої ери, але індійський математик Бхаскара ще в XII ст. відмічає, що люди від'ємних коренів не схвалюють.

Заслуги в розвитку вчення про квадратні рівняння має вже згаданий середньоазіатський математик ал-Хорезмі. Він дає виведення формули розв'язання квадратного рівняння, яке викладається донині у багатьох підручниках. Ал-Хорезмі розв'язує рівняння $x^2 + 10x = 39$ (задача 7 з його збірника) так.

Нехай шукане x є сторона квадрата. Побудуємо на кожній стороні квадрата прямокутники з шириною, що дорівнює чверті коефіцієнта другого члена рівняння, тобто $\frac{10}{4} = \frac{5}{2}$.



Так міркував ал-Хорезмі при розв'язуванні квадратного рівняння.

Площа чотирьох прямокутників дорівнює $\frac{4 \cdot 5}{2} x = 10x$.

Площа утвореної хрестоподібної фігури дорівнює $x^2 + 10x$, тобто лівій частині даного рівняння. Доповнимо цю фігуру чотирма квадратами по кутах до квадрата з стороною $x + 5$. Площа утвореного великого квадрата дорівнює $(x + 5)^2$. Вона є сумою площі хрестоподібної фігури, тобто $x^2 + 10x$, і площі 4 квадратів з стороною $\frac{5}{2}$, тобто $4\left(\frac{5}{2}\right)^2 = 25$.

Маємо:

$$(x + 5)^2 = 39 + 25 = 64, \quad x + 5 = \pm 8,$$
$$x = -5 \pm 8, \quad x_1 = 3, \quad x_2 = -13.$$

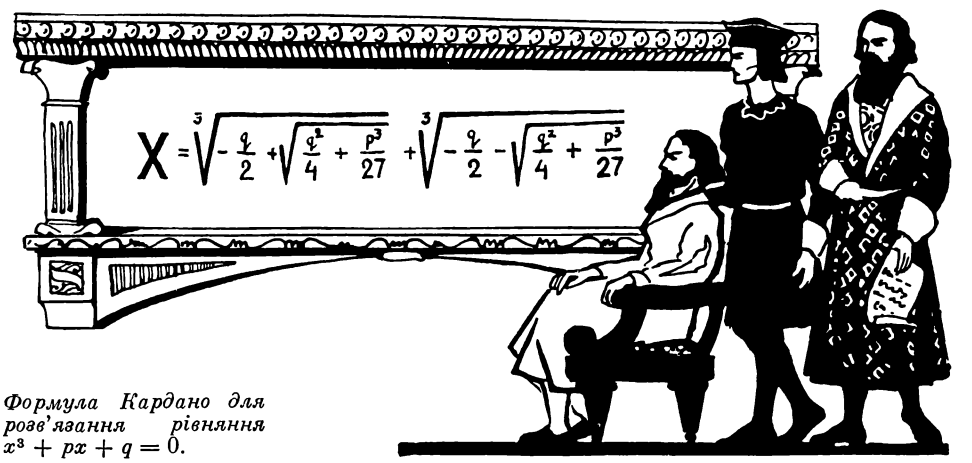
При буквених позначеннях для рівняння $x^2 + px = q$ маємо:

$$\left(x + \frac{p}{2}\right)^2 = q + \frac{p^2}{4}, \quad x + \frac{p}{2} = \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 + q},$$
$$x_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 + q}.$$

В Європі формулами розв'язання квадратних рівнянь різних видів володів Леонардо Пізанський на початку XIII ст.; володіли ними і пізніші математики. Виведення формули в загальному випадку є у Вієта, але і Вієт визнає тільки додатні корені. Італійські математики XVI ст. (Кардано, Тарталья, Феррарі, Бомбеллі) приєднують до додатних коренів не тільки від'ємні, а й уявні, і з цього періоду спосіб розв'язування квадратних рівнянь досягає сучасного вигляду.

РІВНЯННЯ СТЕПЕНЯ ВИЩЕ ДРУГОГО

До рівнянь третього степеня прийшли грецькі математики (Гіппократ, Архімед та ін.) при розв'язуванні геометричних задач (подвоєння куба — знаходження ребра куба, що має подвійний об'єм даного куба; трисекція довільного кута — поділ на три рівні частини та ін.). При геометричному розв'язуванні цих задач зіткнулися з неможливістю побудувати циркулем та лінійкою відрізок, що виражається кубічним коренем. Ці задачі розв'язувалися геометрично за допомогою кривих — гіперболи і параболи. Всі можливі випадки розв'язання кубічного рівняння геометричними методами розглянув середньоазіатський математик і видатний поет Омар Хайям в XI ст. Алгебраїчне розв'язання кубічного рівняння, тобто формула, яка дозволяє виразити корені рівняння через його коефіцієнти, було знайдено в XVI ст. італійськими математиками Ферро, Тартальєю і Кардано. Ця формула носить ім'я Кардано, хоч він не є основною діючою особою в даному відкритті і сам визнавав це.



Формула Кардано для розв'язання рівняння $x^3 + px + q = 0$.

Істотно важливим при розв'язуванні кубічного рівняння в загальному випадку є вираження коренів у тригонометричній формі.

Алгебраїчне розв'язання рівнянь четвертого степеня в загальному випадку знаишов у тому ж віці учень Кардано Феррарі. Свій особливий спосіб для цього дав Л. Ейлер у 1732 р.

Дуже багато видатних математиків робили спроби розв'язати алгебраїчно рівняння п'ятого степеня в загальному випадку, тобто намагалися знайти формулу, за допомогою якої можна було б обчислити корені рівняння за його коефіцієнтами. Однак ці зусилля були марними. Багато математиків (Лейбніц, Ейлер, Гаусс) висловлювали думку, що для рівнянь п'ятого і вищих степенів у загальному випадку не існує алгебраїчної формули для вираження коренів через коефіцієнти. Довів це положення норвезький математик Нільс Абель (1802—1829).

Французький математик Еваріст Галуа (1811—1832) вказав метод, за допомогою якого за виглядом рівняння можна встановити, розв'язується воно алгебраїчно чи ні.

Голландський математик Жірар (1629) висловив припущення, що рівняння n-го степеня має n коренів, коли вважати коренями від'ємні та уявні вирази (сам Жірар не вважав їх коренями рівняння); сміливіше цю думку висловив Декарт, з усією певністю — Ньютон наприкінці XVII ст.

Ейлер у 1742 р. заявив, що всякий алгебраїчний вираз можна розкласти на множники першого або другого степеня з дійсними коефіцієнтами. Ця думка іншими словами означає, що всяке алгебраїчне рівняння має корінь, який може бути числом дійсним або уявним, одне слово — комплексним.

Строго довів це двадцятидворічний Гаусс.

Для обчислення наближених значень коренів рівнянь вищих степенів є багато прийомів, які часто застосовуються на практиці і до рівнянь третього та четвертого степенів, бо абсолютна точність кореня на практиці не завжди потрібна, а застосовувати формули —

Так у різний час позначали невідоме в рівняннях.

справа складна. Самаркандський математик ал-Каші (XV ст.) дав добру наближену формулу для знаходження коренів рівнянь третього степеня, а Ньютон та інші—для рівнянь будь-якого степеня. Дуже важливий метод для цього дав М. І. Лобачевський.

КОЛИ З'ЯВИЛИСЯ ТЕРМІНИ, ЩО ВЖИВАЮТЬСЯ У ВЧЕННІ ПРО РІВНЯННЯ

На закінчення вкажемо час появи деяких термінів, що вживаються у вченні про рівняння.

Герон близько 100 р. до н. е. називав невідоме τ (тау)— «щось».

Ар'ябхата (Індія) в VI ст. н. е. називав невідоме гуліка (кулька), на відміну від відомих величин рупака (монета, на якій зазначено її цінність). Пізніше індійські математики почали називати невідомі словами, що позначають різні кольори.

Діофант позначав невідоме буквою σ, а поняття «дорівнює»— буквою ι (від грецького слова «ізосис» — «рівність»).

Римляни переклали це поняття на свою мову словом equatio— «рівність», і звідси виникли в усіх європейських мовах терміни для позначення рівняння: die Gleichung, the equation. Наше позначення невідомого буквою x походить, очевидно, від італійської назви невідомого «cosa» — «річ» (через що алгебра називалася косичним мистецтвом), запозиченої від арабів, де слово «річ» починається з букви, що відповідає букві x. Декарт остаточно встановив вживання для позначення невідомих останніх букв латинського алфавіту, спочатку частіше вживаючи для цього букву z.

Писати рівняння так, що в одній частині стоять всі члени, а в другій 0, почали в XVIIст. (Харріот, Декарт), раніше це робилося тільки в окремих випадках (відомий також один приклад такого запису у вавілонян).

Замість виразів виду xx, xxx, ... фламандець Стевін (XVI ст.) почав писати 1, 2, 3, ... Декарт ввів знайомі нам скорочення: x^2, x^3, ... Термін коефіцієнт ввів Вієт, степінь рівняння — Декарт. Термін корінь рівняння вживає систематично Шгіфель (німецький священик і математик XVI ст.), але у зв'язку з добуванням кореня при розв'язуванні квадратного рівняння цей термін іноді вживає ще Леонардо Пізанський (XIII ст).

Назву зворотне рівняння ввів Ейлер (1733), термін дискримінант — ірландський математик Гамільтон (близько 1840 р.).

ЩО ТАКЕ КООРДИНАТИ І ДЛЯ ЧОГО ВОНИ СЛУЖАТЬ

Чому так нелегко буває розв'язувати деякі геометричні задачі?

Усім відомо, з якими труднощами доводиться зустрічатися при розв'язуванні багатьох геометричних задач, наприклад таких, як задачі на побудову, на знаходження геометричних місць або на доведення теорем.

У чому ж полягають ці труднощі? Яка їх причина?

Труднощі полягають у тому, що у нас, як правило, немає жодних загальних прийомів, з допомогою яких ми могли б розв'язувати такі задачі.

Часто нова задача потребує знаходження свого особливого способу розв'язування, звичайно зовсім не подібного до тих, якими ми користувалися при розв'язуванні попередніх задач. Доводячи нову теорему, ніколи заздалегідь не знаєш, які допоміжні побудови потрібно буде виконати. А знаходження цих побудов часто потребує тривалих розшуків і різноманітних догадок. Навіть задачі, подібні за своїм змістом одна до одної, розв'язуються прийомами, які часто не мають між собою нічого спільного. Досить пригадати доведення хоч би таких подібних одна до одної теорем, як теореми про три визначні точки трикутника:

1. *Три бісектриси внутрішніх кутів трикутника перетинаються в одній точці.*

2. *Три медіани трикутника перетинаються в одній точці.*

3. *Три висоти трикутника перетинаються в одній точці.*

Ці три теореми подібні одна до одної, оскільки в кожній з них говориться про три прямі, які перетинаються в одній точці. (Звичайно, ці прямі в кожній теоремі різні — інакше не було б трьох різних теорем). І в підручнику ці теореми розташовані близько одна до одної. Але як по-різному їх доводять! Першу теорему доводять зовсім просто: три бісектриси перетинаються в центрі вписаного кола. Але доведення другої теореми, якщо його не знати заздалегідь, знайти самому далеко не просто. Те саме стосується і третьої теореми.

Відсутність загальних прийомів для розв'язування геометричних задач і доведень геометричних теорем є великим недоліком елементарної геометрії. Цей недолік особливо відчутний тому, що в природознавстві, фізиці, механіці і техніці нам доводиться зустрічатися з набагато складнішими лініями і поверхнями, ніж ті, з якими ми маємо справу в шкільній геометрії. Наприклад, в техніці ми зустрічаємося з такими лініями, як еліпс, гіпербола, парабола, ланцюгова лінія, гвинтова лінія, кардіоїда і т. д.

У техніці ми зустрічаємося з такими поверхнями, як еліпсоїди, параболоїди, гіперболоїди, псевдосфери та багатьма іншими. Легко собі уявити, наскільки важче стало геометрам розв'язувати задачі з цими складними кривими поверхнями, коли до всього треба було доходити з догадки!

Природно, що у геометрів виникла думка шукати якісь загальні прийоми для розв'язування найрізноманітніших геометричних задач. Геометри хотіли мати такі прийоми, щоб не гадати, як приступити до розв'язування задачі, а відразу знати, як її розв'язувати.

Але чи існують такі загальні прийоми? Чи не безплідна мрія намагатися їх знайти? Виявляється, такі прийоми існують. Щоб показати, де їх шукати і якими вони можуть бути, спинимося коротко на розв'язуванні арифметичних і деяких геометричних задач, де такі прийоми існують і добре відомі читачам.

Ми знаємо, з якими труднощами доводиться зустрічатися при розв'язуванні навіть не дуже хитромудрих арифметичних задач і наскільки простіше стає розв'язування цих же задач в алгебрі. Чому ж так важко розв'язувати ці арифметичні задачі в арифметиці і в чому полягає те полегшення, яке вносить в їх розв'язування алгебра?

Труднощі розв'язування арифметичних задач такі ж, як і геометричних. Прочитавши умову задачі, ніколи заздалегідь не знаєш, яким способом її розв'язувати, які дії треба виконати над заданими числами. Часто дві навіть подібні задачі розв'язуються зовсім по-різному, і над кожною новою задачею треба думати заново, щоб знайти свій особливий спосіб її розв'язування.

Зовсім інакше стоїть справа в алгебрі. Прочитавши умову задачі, ми завжди відразу знаємо, що́ нам треба зробити для її розв'язання. Позначивши невідомі через x, y,..., ми шукаємо з умови задачі кількості, які дорівнюють одна одній. Звичайно, ці розшуки теж потребують деякої навички, однак ми знаємо, що всі школярі з ними успішно справляються. Знайшовши ці рівні кількості і прирівнюючи їх, ми дістаємо рівняння, які і розв'язуємо за відомими правилами алгебри. Таким чином, в алгебрі для всіх задач є один загальний спосіб їх розв'язування — він полягає у складанні і розв'язуванні рівнянь. Це і зумовлює відносну легкість алгебраїчного розв'язування задач. Чи користується геометрія рівняннями? Так! Але тільки далеко не в усіх випадках. Там, де геометрія використовує рівняння, вони відразу спрощують розв'язання задач. Кожен з свого досвіду добре знає, наскільки простіше розв'язуються задачі на обчислення (де ми користуємося рівняннями), ніж на побудову або на доведення.

Однак з допомогою рівнянь розв'язуються далеко не всі геометричні задачі. Зокрема,

для задач на геометричні місця і на доведення геометричних теорем далеко не завжди можна підібрати такі алгебраїчні розв'язання. Це, як ми говорили, і примусило геометрів шукати такі способи розв'язування задач, які можна було б за загальним правилом застосовувати якщо не до всіх, то до величезного числа найрізноманітніших геометричних задач, навіть таких, де поряд з найпростішими геометричними лініями і поверхнями беруть участь і складніші, про які ми вище говорили. Ці способи грунтуються на використанні системи координат. Але перш ніж розповідати про ці способи, нам треба ознайомитися з системою координат.

СИСТЕМА КООРДИНАТ

Тут ми розглянемо лише планіметричні задачі і тому говоритимемо про систему координат на площині.

Проведемо на площині дві взаємно перпендикулярні прямі, для спрощення — горизонтальну та вертикальну (рис. 1), і позначимо точку їх перетину буквою O. Її ми називатимемо початком координат. Приймемо деякий відрізок OE за одиничний. Це значить, що його довжину ми вважатимемо одиницею масштабу при вимірюванні довжин будь-яких відрізків, які ми відкладатимемо на наших прямих. (Для спрощення, хоч це і не обов'язково, вважатимемо одиницю масштабу однією й тією ж для обох прямих).

Через те що на кожній з прямих від точки O можна відкладати відрізки у двох протилежних напрямах, то ми приймемо напрями зліва направо на горизонтальній прямій і знизу вгору на вертикальній за додатні.

Протилежні їм напрями вважатимемо від'ємними. Горизонтальну пряму, на якій ми встановили додатний напрям, назвемо віссю абсцис, або віссю Ox. Вертикальну пряму назвемо віссю ординат, або віссю Oy. Обидві прямі разом називаються системою координат.

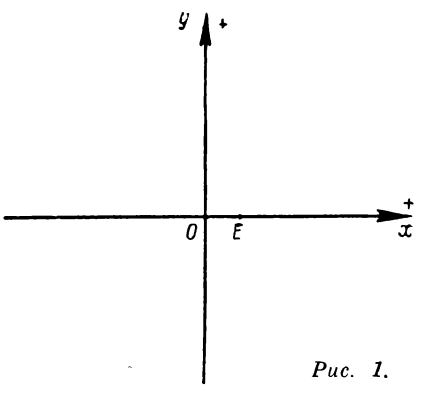


Рис. 1.

Система координат, про яку ми щойно говорили, називається декартовою за ім'ям французького математика Рене Декарта (1596—1650), який вперше ввів її в своїй книзі «Геометрія», виданій у 1637 р.

Система координат служить для того, щоб з її допомогою задавати в площині положення точок, відрізків і різних геометричних фігур (тому вона і називається системою координат, тобто в дослівному перекладі «системою співвіднесення»). Нехай в площині, де у нас накреслено систему координат, позначена якась-небудь точка M (рис. 2). Щоб схарактеризувати її положення відносно системи координат, опустимо з точки M перпендикуляри MM_1 на вісь Ox і MM_2 на вісь Oy. Довжина відрізка OM_1, виміряна у прийнятому масштабі і взята з певним знаком, називається абсцисою точки M і позначається в загальному випадку буквою x. Довжина відрізка OM_2, виміряна в цьому ж масштабі і взята з певним знаком, називається ординатою точки M і позначається в загальному випадку буквою y. Знаки абсциси та ординати встановлюються так: якщо точка M_1 лежить справа від точки O, то абсциса x вважається, згідно з нашою умовою про додатний напрям на осі Ox, додатною, а якщо точка M_1 лежить зліва від точки O, то абсциса вважається від'ємною. Так само, якщо точка M_2 лежить вище від точки O, то ордината y вважається додатною, а якщо точка M_2 лежить нижче від точки O, то ордината вважається від'ємною. Абсциса та ордината точки M, взяті разом, називаються координатами точки M.

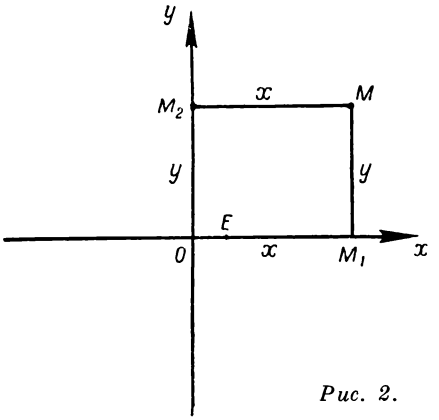


Рис. 2.

У нашому прикладі було дано точку M, і ми визначали її координати. Але може ставитися і обернена задача: дано координати точки N, і за ними треба побудувати точку N.

Нехай, наприклад, нам задана система координат і дані абсциса $x = 3$ і ордината $y = 5$ деякої точки N; це записують у вигляді $N(x = 3, \quad y = 5)$ або ще коротше: $N(3, 5)$.

Абсциса завжди пишеться на першому місці, а ордината— на другому).

Побудуємо точку N. Для цього (рис. 3) відкладемо відрізок ON_1, що дорівнює 3 одиницям масштабу, по осі Ox вправо від точки O і відрізок ON_2, що дорівнює 5 одиницям, по осі Oy вгору від точки O (через те що 3 і 5 — додатні числа). З точки N_1 поставимо перпендикуляр до осі Ox, а з точки N_2 — перпендикуляр до осі Oy. Точка перетину перпендикулярів і буде точкою N.

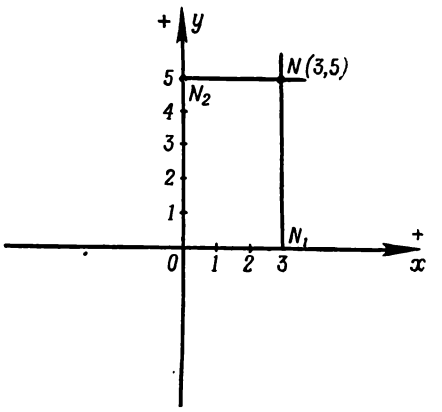


Рис. 3.

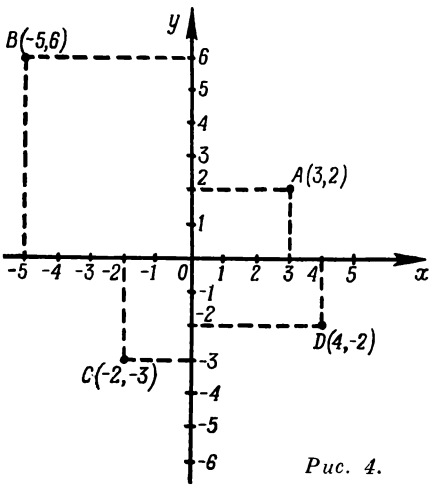


Рис. 4.

Приклад. На рис. 4 побудовані точки $A(3, 2)$, $B(-5, 6)$, $C(-2, -3)$, $D(4, -2)$.

Таким чином, ми бачимо, що кожна точка M площини має цілком певні координати x, y; і навпаки: задання абсциси та ординати (x і y) визначає на площині єдину точку M.

Якщо в площині задана система координат, то відносно неї ми можемо задавати не тільки розміщення точок, а й будь-яких фігур. Наприклад, якщо ми хочемо задати розміщення $\triangle MNP$, то для цього досить задати координати кожної з його вершин (рис. 5).

Природно припустити, що коли фігуру (наприклад трикутник) можна повністю задати координатами тих точок, які її визначають, то, користуючись цими ж координатами, можна визначити і всі елементи фігури, зокрема довжини сторін, кути, площі і т. д. Це припущення виправдується.

Покажемо, наприклад, як визначити довжину відрізка AB, знаючи координати його кінців A і B.

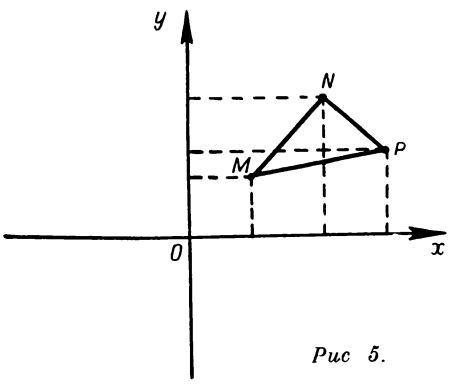


Рис 5.

Нехай нам задані дві точки A і B своїми координатами $A(4, 2)$ і $B(7, 6)$ (рис. 6). Треба знайти довжину відрізка AB.

Зробимо так: опустимо з точки B перпендикуляр BB' на вісь Ox. З точки A опустимо перпендикуляр на відрізок BB'. В перетині цього перпендикуляра з відрізком BB' дістанемо точку C. Ми дістали прямокутний трикутник ABC. За теоремою Піфагора нам відомо, що

$$AB^2 = AC^2 + CB^2.$$

У нашому випадку маємо:

$$AC = 7 - 4 = 3,$$
$$CB = 6 - 2 = 4.$$

Тоді

$$AB = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5.$$

Ми могли б і в загальному, алгебраїчному, вигляді записати нашу формулу для визначення довжини відрізка. Для цього припустимо, що нам задані точки A і B своїми координатами, вираженими в буквеній формі. Нехай вони будуть $A(x_1, y_1)$ і $B(x_2, y_2)$. Аналогічно до попереднього побудуємо прямокутний трикутник ABC (рис. 7).

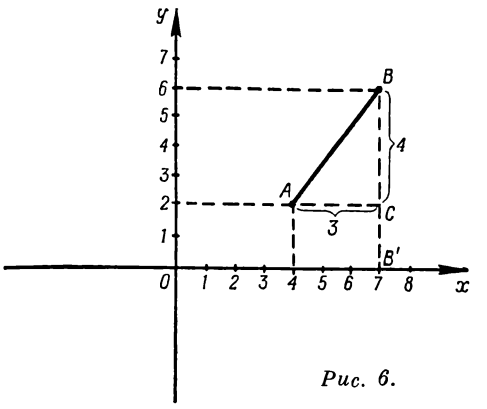


Рис. 6.

Тоді дістанемо:

$$AC = x_2 - x_1,$$
$$CB = y_2 - y_1.$$

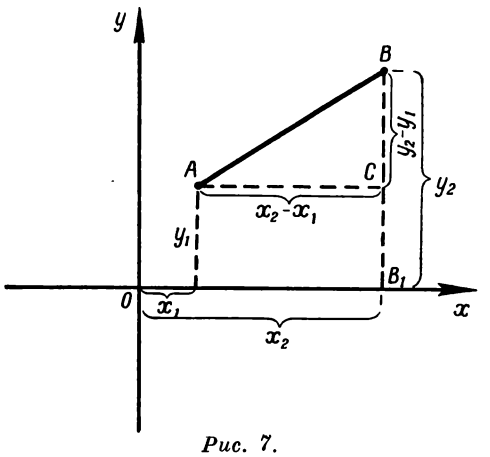


Рис. 7.

Отже, за теоремою Піфагора

$$AB^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2.$$

І остаточно дістаємо довжину відрізка AB за формулою[1]:

$$AB = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \qquad (1)$$

Зрозуміло, що перед коренем ми завжди беремо знак «плюс», бо довжина відрізка є число додатне.

Якщо порівняти загальну формулу (1) з формулою попереднього прикладу, то ми побачимо, що остання є окремим випадком загальної формули (1). Саме в попередньому випадку ми мали

$$x_1 = 4,\ y_1 = 2,\ x_2 = 7,\ y_2 = 6.$$

Таким чином, ми маємо спосіб для обчислення довжин будь-яких відрізків, які входять до складу першого-ліпшого многокутника, наприклад довжин сторін трикутників, чотирикутників і т. д. З розглянутого прикладу видно, що з допомогою системи координат ми можемо розв'язувати багато задач, н а в і т ь н е з о б р а ж у ю ч и самої фігури на рисунку. Дійсно, цілком зрозуміло, що, маючи загальну буквену формулу (1) для визначення довжини відрізка AB, ми могли б визначити віддаль між точками A (4, 2) і B (7, 6), навіть не креслячи відрізка AB, а тільки підставляючи координати точок A і B у формулу (1), як ми це і показали після виведення загальної формули (1).

Це особливо добре видно на такому прикладі.

Запишемо (без доведення) формулу для визначення площі трикутника за даними координатами його вершин.

Якщо вершини трикутника $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$ і $C(x_3, y_3)$ (рис. 8) задані їх координатами, то формула для площі трикутника ABC матиме вигляд:

$$S = \frac{1}{2} \left| \{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)\} \right|.$$

(Вертикальні рисочки показують, що величину, яка стоїть між ними, ми беремо за її абсолютним значенням).

Розглянемо числовий приклад на застосування цієї формули.

П р и к л а д. Нехай трикутник заданий своїми вершинами $A(3, 4)$, $B(5, 7)$, $C(9, 6)$. Знайти його площу.

Вважатимемо, що

$$x_1 = 3,\ x_2 = 5,\ x_3 = 9;$$
$$y_1 = 4,\ y_2 = 7,\ y_3 = 6.$$

Підставляємо ці значення в нашу формулу. Знаходимо

$$S = \frac{1}{2} \left| \{(5 - 3)(6 - 4) - (9 - 3)(7 - 4)\} \right| =$$
$$= \frac{1}{2} \left| -14 \right| = 7.$$

Ми знайшли площу трикутника без усякого рисунка. Якщо тепер зробити рисунок (рис. 9) і підрахувати площу нашого трикутника по кліточках, то неважко переконатися, що нашу задачу розв'язано правильно.

Таким чином, і на цьому прикладі ми бачимо, що використання системи координат знову

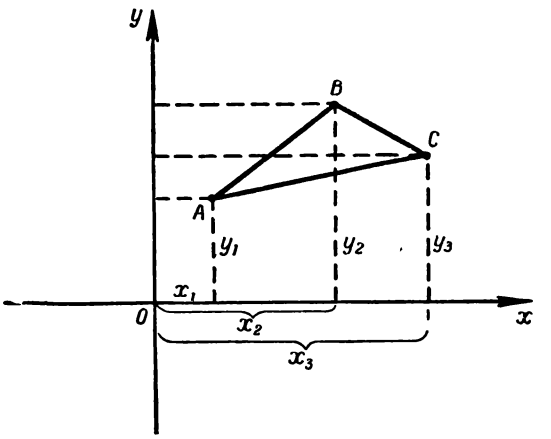


Рис. 8.

[1] Легко довести справедливість цієї формули при будь-якому розміщенні точок відносно системи координат.

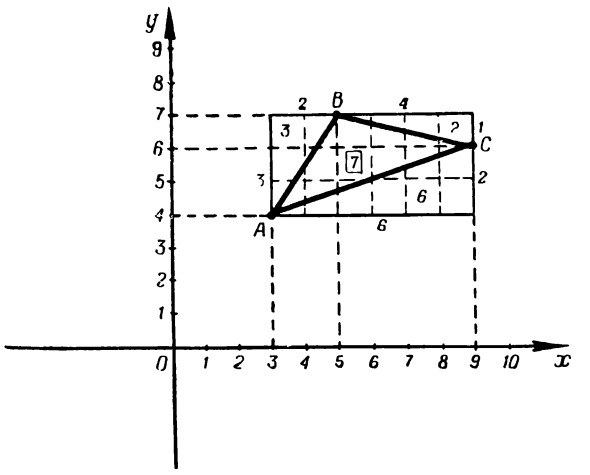


Рис. 9

дало нам змогу розв'язати задачу, навіть не креслячи тієї фігури (трикутника), про яку в ній ішла мова.

Це — дуже важлива властивість системи координат, бо в багатьох випадках вона позбавляє нас необхідності виконувати іноді дуже громіздкі рисунки.

У повсякденному житті ми часто користуємося системою координат, звичайно навіть не задумуючись над цим.

Ось прості приклади. Купуючи квиток у кіно, ми читаємо на ньому номери ряду і місця в ряду. Наприклад, ряд 5, місце 4. По суті, як показує рис. 10, ці числа — не що інше, як координати нашого місця.

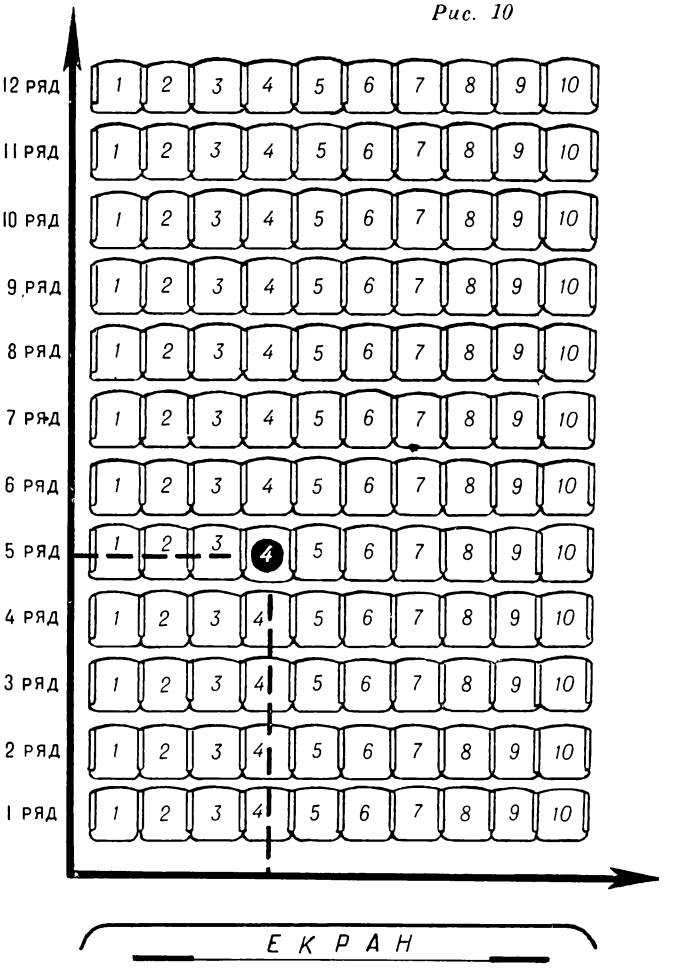
Ось приклад для шахіста. Граючи турнірну партію, шаховий майстер звичайно її записує. А любителі шахів, користуючись цим записом (шаховою нотацією), можуть її розіграти та проаналізувати. На чому грунтується запис шахової партії? На системі координат, яку шахіст у думці вводить на шаховій дошці. Записуючи хід Kg1 — f3, він повідомляє, що його кінь, який стояв на полі з координатами (g, 1), перейшов на поле з координатами (f, 3) (рис. 11).

Тільки тут поля уздовж осі *Ox* позначаються не числами, а буквами.

Розглянемо найважливіші застосування системи координат.

Використання координатної системи має в основному двоякий характер. По-перше, з її допомогою будують графіки різних залежностей, з якими ми зустрічаємося в природознавстві, фізиці, механіці, техніці і в самій математиці,

Рис. 10



а також в інших науках. По-друге, як ми вже про це говорили напочатку, система координат дозволяє знаходити деякі з а г а л ь н і прийоми для розв'язування найрізноманітніших геометричних задач. Зараз ми пояснимо все це на прикладах.

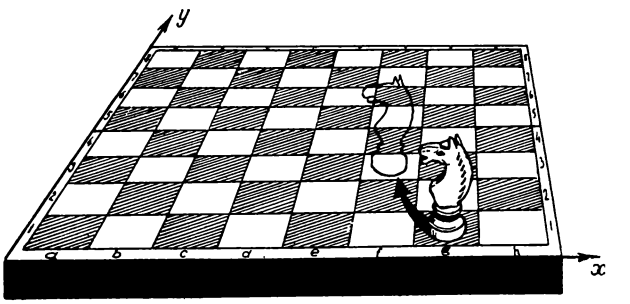


Рис 11.

ПОБУДОВА ГРАФІКІВ

Кожному з читачів, мабуть, не раз доводилося мати справу з графіками як у фізиці, так і в математиці.

Очевидно, всім траплялося рівняння рівномірного руху

$$s = vt,$$

де s позначає шлях, пройдений тілом за час t, а v — це стала швидкість рівномірного руху цього тіла. Графік цього рівняння зображає пряму лінію. Він поданий на рис. 12.

Вкажемо ще один приклад графіка, цього разу з алгебри, і нагадаємо його побудову. Нехай нам дано рівняння

$$y = x^2.$$

Надаючи різних значень абсцисі x і обчислюючи відповідні значення ординати y, дістанемо таблицю:

x	...	−4	−3	−2	−1	0	1	2	3	4	...
y	...	16	9	4	1	0	1	4	9	16	..

За цією таблицею ми можемо побудувати лише окремі точки нашого графіка. Якщо ми надаватимемо абсцисі x не тільки цілих значень, а й проміжних, дробових, і обчислюватимемо за ними відповідні значення ординати y, то побудовані після цього точки нашого графіка розміщуватимуться тісніше одна до одної. Сполучаючи побудовані таким способом точки плавною лінією, ми з достатнім ступенем точності побудуємо графік нашого рівняння (рис. 13).

Читач, очевидно, погодиться з тим, що залежність, зображена графічно, більш наочна, ніж залежність, задана формулою. Маючи графік, ми відразу, з одного погляду, схоплюємо взаємовідношення між у с і м а значеннями змінних і бачимо, як зміни одного з них впливають на зміни другого. Тим часом без графіка ми затратили б набагато більше праці на те, щоб виявити ці взаємовідношення з формули.

Розглянуті приклади показують нам, що р і в н я н н я м і ж д в о м а з м і н н и м и в е л и ч и н а м и в и з н а ч а є д е я к у л і н і ю (випадки, коли рівняння не визначає лінії, зустрічаються рідко, і ми їх тут не розглядаємо).

РІВНЯННЯ ЛІНІЙ

Все сказане приводить нас до дуже глибоких висновків, у яких з особливою повнотою розкривається значення системи координат. Ми бачили, що, знаючи рівняння, яке зв'язує дві змінні величини x і y, ми можемо за ним побудувати графік, тобто л і н і ю. Тому можна сказати, що рівняння у своєму буквеному алгебраїчному записі ніби в стислому вигляді містить всі ті властивості лінії, які ми виявляємо у неї на рисунку. Це приводить до того, що дуже часто властивості лінії вивчаються не за її зображенням на рисунку, а за її рівнянням. Але звідси, цілком природно, виникає така цікава думка. Якщо рівняння, до якого входять x і y, містить у собі властивості свого графіка, то чи не можна розв'язати і обернену задачу: знаючи

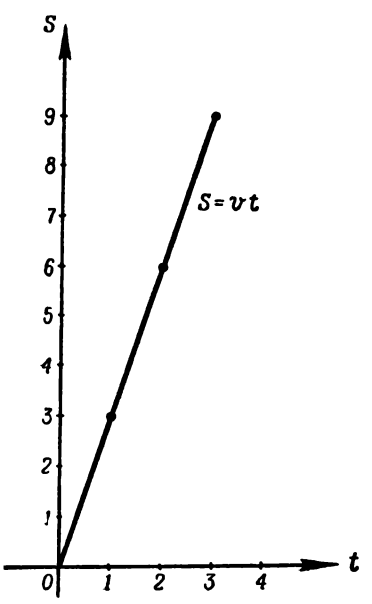


Рис. 12.

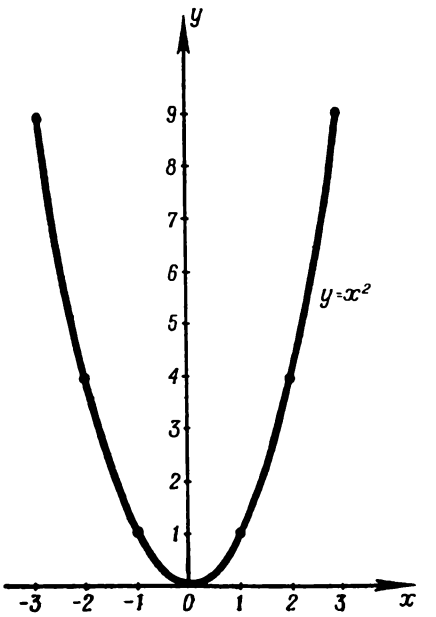


Рис. 13.

властивості лінії, скласти для неї рівняння (графіком якого вона була б)?

Виявляється, цю задачу розв'язати можна.

Ми почнемо з одного, дуже простого, можна сказати очевидного, прикладу, для того, щоб на ньому показати, як складаються рівняння ліній, а потім переидемо до цікавіших і складніших випадків та подивимося, які висновки з цього виходять.

Приклад 1. Скласти рівняння лінії, що лежить в I і III координатних кутах, кожна точка якої розміщена вдвоє ближче до осі Oy, ніж до осі Ox.

Щоб скласти рівняння нашої лінії, візьмемо систему координат (рис. 14) і позначимо в ній яку-небудь точку M цієї лінії. Ми можемо вважати, що наша лінія описана рухом цієї точки M.

Запишемо тепер алгебраїчно ту властивість, яка визначає шукану лінію, тобто властивість, яку має кожна її точка (і тільки її точки), а значить, і точка M під час свого руху. Опускаючи з точки M перпендикуляри на осі Ox і Oy та позначаючи їх основи відповідно через M_1 і M_2, можемо сказати, що за умовою задачі M_2M буде вдвоє менше, ніж M_1M, тобто можемо записати:

$$M_1M = 2M_2M.$$

Але ми бачимо, що M_1M є ордината y точки M, а M_2M є абсциса x точки M. Підставляючи в наше рівняння замість M_2M і M_1M координати x і y, дістанемо рівняння

$$y = 2x.$$

Ми можемо твердити, що це і є шукане рівняння нашої лінії, бо її можна побудувати як графік цього рівняння. Ця лінія є прямою. Справді, надаючи абсцисі x різноманітних значень і обчислюючи за ними відповідні значення ординати y, дістанемо таблицю:

x	...	−3	−2	−1	0	1	2	3	...
y	...	−6	−4	−2	0	2	4	6	...

Через те що ми можемо вважати, що ця лінія описана рухом точки M, то ми називаємо точку M змінною точкою, а її координати x і y — змінними координатами.

Тут ми вивели рівняння прямої лінії, яка проходить через початок координат. Виведемо тепер рівняння прямої, довільно розміщеної в площині. Для цього насамперед треба якось задати розміщення прямої відносно системи координат. Задамо нашу пряму точкою B, в якій вона перетинає вісь Oy, і кутом α, який вона утворює з додатним напрямом осі Ox (рис. 15). Нашу задачу можна тепер сформулювати так.

Приклад 2. Скласти рівняння прямої, що перетинає вісь Oy у точці $B(0, b)$ і нахилена до осі Ox під кутом α.

Щоб скласти рівняння прямої, розглянемо на ній змінну точку M з координатами x і y. Запишемо алгебраїчно умову, яку повинна задовольняти змінна точка M, що описує нашу пряму. Неважко помітити, що ця умова має вигляд:

$$\frac{AM}{BA} = \operatorname{tg}\alpha.$$

Дійсно, де б не розміщувалася точка M на прямій, ця умова завжди справджується. І навпаки, ця умова перестане справджуватися, як тільки точка M зійде з нашої прямої.

Запишемо тепер величини, що входять до нашого рівняння, через задані величини, які визначають пряму (b і α), і через координати змінної точки x і y.

Маємо: $AM = y - b$, $BA = x$. Рівняння набирає вигляду:

$$\frac{y-b}{x} = \operatorname{tg}\alpha.$$

Розв'язуючи його відносно y, дістаємо:

$$y = \operatorname{tg}\alpha \cdot x + b.$$

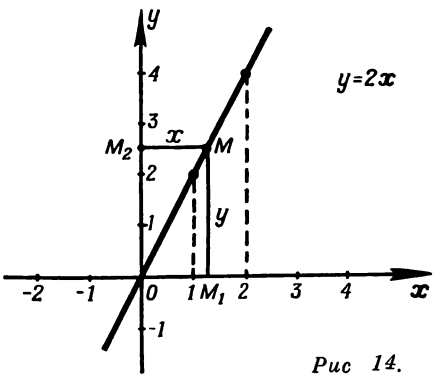


Рис 14.

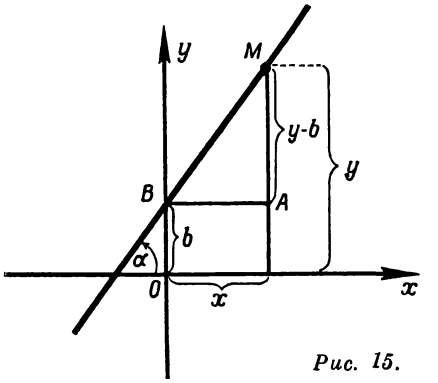


Рис. 15.

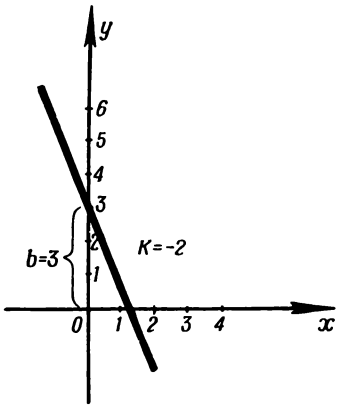


Рис. 16.

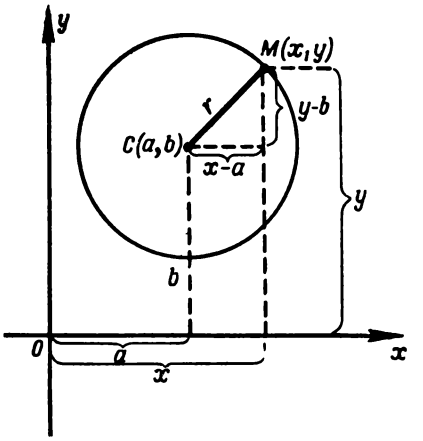


Рис. 17

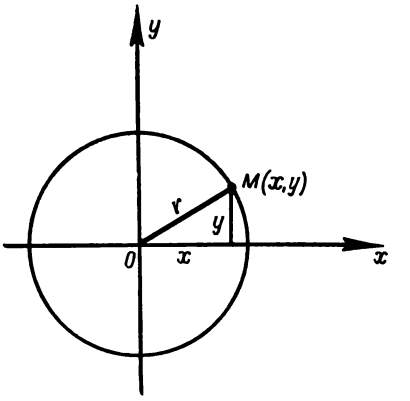


Рис. 18.

Звичайно $\operatorname{tg}\alpha$ заміняють буквою k, після чого рівняння прямої набирає вигляду:

$$y = kx + b.$$

Величина k називається кутовим коефіцієнтом прямої. З виведення нашого рівняння ясно, що величини k і b можуть мати будь-які числові значення. Наприклад, якщо точка B лежить нижче осі Ox, то b буде від'ємним. Якщо пряма буде нахилена до осі Ox під тупим кутом, то k буде від'ємним. Вони також можуть дорівнювати 0.

Треба зауважити, що рівняння прямої, паралельної осі Oy, не можна написати у вигляді $y = kx + b$, бо в цьому разі $k = \operatorname{tg} 90^\circ$, тобто не існує.

На рис. 16 побудовано пряму за рівнянням

$$y = -2x + 3.$$

Приклад 3. Вивести рівняння кола з центром у точці $C(a, b)$ і радіусом, який дорівнює r (рис. 17).

Для виведення рівняння кола треба алгебраїчно записати ту властивість, якою воно визначається. Як ми знаємо, коло є геометричне місце точок, що їх віддаль від заданої точки (центра) є стала величина, яка називається радіусом.

Нехай змінною точкою кола буде точка $M(x, y)$. Запишемо, що її відстань від точки C (центра) дорівнюватиме радіусу: $CM = r$. Вважаючи точку C першою точкою, а точку M другою, ми можемо обчислити відстань CM за формулою (1), вважаючи, що $x_1 = a$, $y_1 = b$, $x_2 = x$, $y_2 = y$. Тоді знайдемо:

$$CM = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2},$$

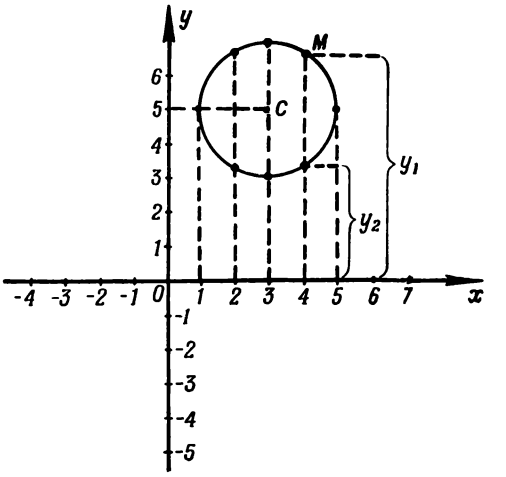


Рис. 19.

звідки

$$\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2} = r.$$

Щоб позбутися знака радикала, підносимо обидві частини рівняння до квадрата; знаходимо рівняння кола в остаточному вигляді:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2.$$

Якщо центр — початок координат, то треба вважати, що $a = 0$ і $b = 0$ (рис. 18). Тоді рівняння набере вигляду:

$$x^2 + y^2 = r^2.$$

На рис. 19 побудовано коло за рівнянням

$$(x-3)^2 + (y-5)^2 = 4.$$

Після наведених двох прикладів читач може запитати: «Навіщо виводити рівняння пря-

мої і кола, коли і без рівнянь їх можна легко побудувати: пряму по лінійці, а коло — циркулем?»

Відповідь на це запитання читач дістане трохи пізніше. Поки що зауважимо, що головна мета, яку ми ставимо, виводячи ці рівняння, полягає не в побудові за ними прямої або кола, а в тому, щоб ці рівняння дали змогу розв'язувати багато важких геометричних задач, зв'язаних з цими лініями.

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ВАЖКИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ЗАДАЧ З ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ КООРДИНАТ

Виведення рівнянь прямої і кола приводить нас до такого важливого висновку: *для того щоб скласти рівняння лінії, треба лінію розглядати як сукупність усіх точок, що мають деяку певну властивість.*

Алгебраїчний запис цієї властивості через координати x і y змінної точки M лінії і дає нам рівняння цієї лінії.

Таким чином, ми маємо дуже важливий висновок. Користування системою координат дозволяє нам:

1. Знаючи рівняння лінії, побудувати лінію як графік цього рівняння.

І навпаки:

2. Знаючи властивість, що визначає лінію як сукупність точок, ми можемо скласти рівняння цієї лінії.

Друге з цих тверджень і дає нам ті загальні прийоми розв'язування різноманітних важких геометричних задач, про які ми говорили на початку нашої статті.

Бажаючи розв'язати яку-небудь важку геометричну задачу або довести теорему, ми зробимо так. Запишемо умову нашої задачі або теореми в алгебраїчному вигляді (як ми це щойно робили). Цей запис і дасть нам рівняння лінії, про яку йде мова в задачі. Іноді залежно від умов задачі в ній може виникнути і кілька рівнянь. Кожне таке рівняння матиме всі властивості лінії, яку воно визначає. Тому ми зведемо розв'язування нашої геометричної задачі до дій з рівняннями. А це, як ми знаємо з сказаного на початку нашої статті, значно спрощує її розв'язання.

Ось два приклади, що підтверджують нашу думку.

З а д а ч а. Дано дві точки, що мають координати $A\,(1, 0)$ і $B\,(9, 0)$ (рис. 20). Знайти, по якій лінії рухається точка, яка весь час залишається втроє ближче до точки A, ніж до точки B.

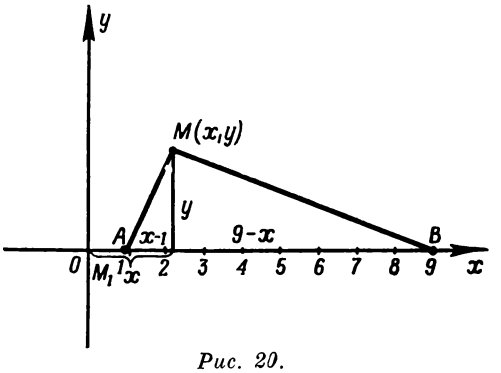


Рис. 20.

Якщо спробувати розв'язати цю задачу як суто геометричну (не користуючись рівняннями), то нам доведеться серйозно над нею задуматися, бо відразу важко сказати, по якій лінії рухатиметься наша точка. Тим часом, якщо скористатися тими міркуваннями, про які ми щойно говорили, то розв'язок цієї задачі ми знайдемо відразу і майже без труда.

Ми знаємо, що шукана лінія характеризується тим, що кожна її точка M перебуває втроє ближче до точки A, ніж до точки B, тобто MB втроє більше, ніж MA. Запишемо цю властивість алгебраїчно:

$$3MA = MB. \qquad (1')$$

Позначимо координати нашої рухомої точки M через x і y. Тоді, користуючись формулою (1), ми зможемо виразити відстані MA і MB через координати A, B і M. Знайдемо:

$$MA = \sqrt{(x-1)^2 + y^2},\quad MB = \sqrt{(9-x)^2 + y^2}.$$

Вставляючи тепер ці вирази у формулу (1'), дістанемо:

$$3\sqrt{(x-1)^2 + y^2} = \sqrt{(9-x)^2 + y^2}.$$

Щоб позбутися знаків радикала, піднесемо обидві частини нашого рівняння до квадрата. Одночасно розкриємо дужки під радикалами. Тоді дістанемо:

$$9(x^2 - 2x + 1 + y^2) = 81 - 18x + x^2 + y^2.$$

Перенісши тепер члени x^2 і y^2 у ліву частину рівності, а вільний член — у праву і скоротивши обидві її частини на 8, знайдемо рівняння

$$x^2 + y^2 = 9.$$

Ми дістали рівняння, графіком якого є коло з центром у початку координат. Радіус його дорівнює 3 (рис. 21). Це значить, що кожна

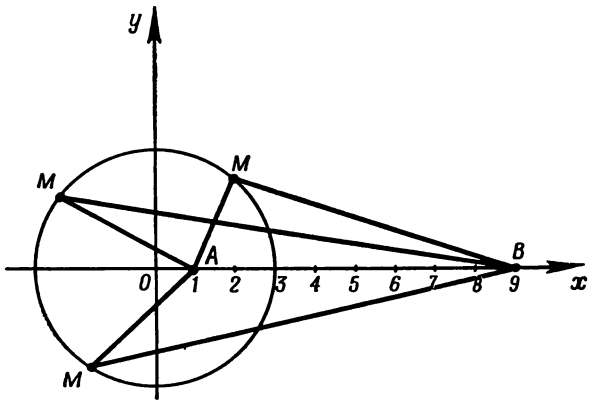


Рис. 21.

точка M цього кола задовольняє умови нашої задачі. Інакше кажучи, точка M, яка при своєму русі весь час залишатиметься втроє ближче до точки A, ніж до точки B, рухатиметься по цьому колу.

Ми бачимо, як легко і, можна сказати, «автоматично» ми дістали розв'язок цієї задачі. Такими ж прийомами розв'язується і багато інших задач.

Читачеві, який захотів би спробувати розв'язати цю задачу без системи координат, ми дамо такі короткі пояснення. Як ми бачимо, відстань між нашими точками A і B дорівнює 8 одиницям (рис. 22). Нехай існує точка M, яка задовольняє умови нашої задачі, тобто для якої $\frac{MA}{MB} = \frac{1}{3}$.

Поділимо відрізок AB у відношенні 1 : 3. Шуканою точкою поділу буде точка C, віддаль якої від точки A дорівнює 2 одиницям, а відношення $AC : CB = 2 : 6 = 1 : 3$. Сполучимо точку M з точками A, B, C. Тоді ми можемо твердити, що пряма MC буде бісектрисою $\angle AMB$ трикутника AMB. Дійсно, існує теорема, що бісектриса кута ($\angle AMB$) трикутника ділить протилежну йому сторону на частини, пропорціональні прилеглим сторонам. Справедлива і обернена їй теорема: *Якщо вершину кута трикутника сполучити з точкою протилежної сторони, яка ділить її у відношенні інших двох сторін, то ця пряма буде бісектрисою цього кута.* В нашому випадку маємо:

$$\frac{AM}{MB} = \frac{1}{3}, \quad \frac{AC}{CB} = \frac{1}{3}.$$

Звідси

$$\frac{AM}{MB} = \frac{AC}{CB},$$

тобто бісектриса $\angle AMB$ пройде через точку C. Далі, існує теорема, що бісектриса зовнішнього кута ($\angle AMN$) трикутника ($\triangle AMB$) ділить протилежну сторону (як кажуть, «зовнішньо») теж на частини, пропорціональні прилеглим сторонам. Якщо в нашому випадку пряма MD буде бісектрисою зовнішнього кута, то точка D стоятиме від точки A вліво на 4 одиниці. Дійсно, тоді маємо:

$$\frac{AD}{DB} = \frac{4}{12} = \frac{1}{3}, \quad \frac{AM}{MB} = \frac{1}{3}, \text{ тобто } \frac{AD}{DB} = \frac{AM}{MB}.$$

Легко переконатися, що кут між двома бісектрисами MC і MD — прямий: $2\alpha + 2\beta = 180°$ і, отже, $\alpha + \beta = 90°$.

Звідси висновок: точка M лежить на колі, діаметром якого є відрізок CD, що дорівнює 6 одиницям. Можна довести і обернене твердження, тобто що в с я к а точка цього кола задовольнятиме умови нашої задачі.

Ця побудова може бути і не такою складною, якщо тільки заздалегідь її знати. Придумати її вперше значно важче.

Цікаво відзначити, що існує і загальна теорема:

Геометричним місцем точок M, відстані кожної з яких до двох даних точок A і B (тобто AM і BM) становлять стале відношення $m : n$ ($m \neq n$), є коло (так зване коло Аполлонія) (рис. 22).

Діаметром цього кола є відрізок, кінці якого ділять відрізок AB у відношенні $m : n$ внутрішнім і зовнішнім способом.

Якщо $m = n$, то, як легко бачити, шуканим геометричним місцем буде пряма, яка перпендикулярна до відрізка AB і проходить через його середину (рис. 23).

Розглянемо ще одну задачу, розв'язання якої суто геометричними прийомами (тобто з допомогою побудови) становить значні труднощі, тоді як, застосовуючи систему координат, її розв'язати дуже легко.

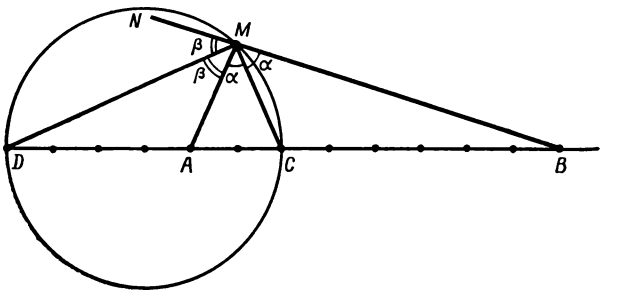


Рис. 22.

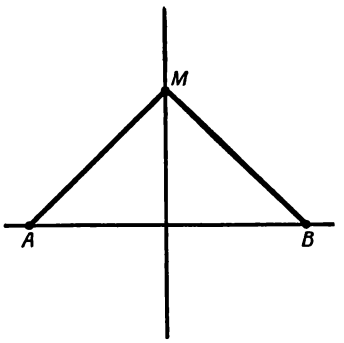


Рис. 23.

Задача. Всередині прямого кута дано точку M. Провести через неї пряму так, щоб відрізуваний нею прямокутний трикутник OAB мав задану площу S (рис. 24).

Ми не шукатимемо розв'язання цієї задачі суто геометричним способом (рекомендуємо бажаючим пошукати його самостійно), а відразу введемо систему координат і покажемо координатний спосіб її розв'язання.

Розмістимо систему координат так, щоб її початок збігся з вершиною прямого кута, а додатні напрями осей Ox і Oy збіглися з сторонами кута OA і OB (рис. 25).

Положення точки M задамо її координатами p і q, які вважатимемо відомими.

Наше завдання тепер полягає в тому, щоб провести через точку $M(p, q)$ пряму під таким кутом α до осі Ox, щоб площа трикутника OAB дорівнювала S, тобто щоб

$$\frac{OA \cdot OB}{2} = S, \text{ або } OA \cdot OB = 2S. \qquad (1)$$

Через те що ми розв'язуватимемо нашу задачу обчислювальним способом, то поставимо собі завдання знайти рівняння шуканої прямої, за яким ми зможемо її потім побудувати.

Рівняння прямої, як ми знаємо, записується у вигляді (див. стор. 132)

$$y = kx + b. \qquad (2)$$

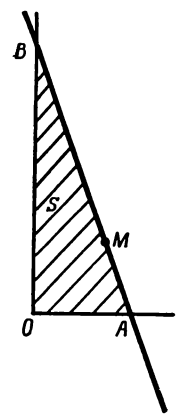


Рис. 24.

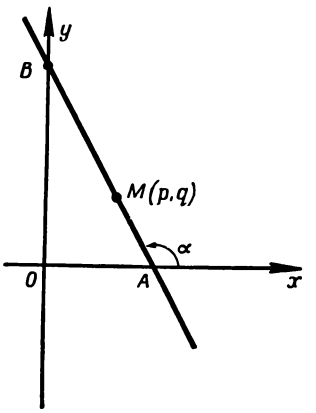


Рис. 25.

До цього рівняння входять дві сталі величини k і b, які ми і повинні знайти з умови задачі. Величину b ми знайдемо, виходячи з того, що наша пряма проходить через точку $M(p, q)$, а величину k — з умови (1), що визначає площу трикутника AOB.

Через те що наша пряма проходить через точку $M(p, q)$, то координати p і q цієї точки повинні задовольняти рівняння прямої, тобто якщо ми підставимо в рівняння (2) замість x величину p, а замість y величину q, то повинні дістати рівність

$$q = kp + b.$$

З цієї рівності ми можемо виразити b через k. Маємо:

$$b = q - kp.$$

Підставляючи це значення в рівняння (2), знаходимо:

$$y = kx + q - kp. \qquad (3)$$

Тепер нам залишилося знайти k. Будемо його шукати, виходячи з умови, що відрізки OA і OB, які шукана пряма відтинає на осях координат, повинні задовольняти умову (1). Знайдемо самі ці відрізки. Відрізок $OB = b$ ми вже знайшли:

$$OB = b = q - kp.$$

Підставивши в рівняння (3) значення ординати точки A, тобто значення $y = 0$, ми знайдемо з цього рівняння значення абсциси $x = OA$ точки A. Маємо:

$$0 = kx + q - kp,$$

звідки

$$OA = x = \frac{kp - q}{k}.$$

Таким чином, обидва відрізки виражені через одне невідоме k. Підставляючи в умову (1) знайдені нами величини відрізків OA і OB, знаходимо k:

$$\frac{kp - q}{k}(q - kp) = 2S.$$

Позбуваючись знаменника і виносячи в другому множнику за дужки —1, маємо:

$$-(kp - q)^2 = 2kS.$$

Розкриваємо дужки і змінюємо всі знаки на протилежні. Дістаємо:

$$p^2k^2 - 2(pq - S)k + q^2 = 0.$$

Це — квадратне рівняння з одним невідомим k. Всі інші величини (p, q, S), які входять у рівняння, нам задані.

Розв'язуємо рівняння відносно k. Маємо:

$$k = \frac{pq - S \pm \sqrt{(pq-S)^2 - p^2q^2}}{p^2}.$$

Спрощуючи підкореневий вираз, знаходимо для k остаточний вираз:

$$k = \frac{pq - S \pm \sqrt{S(S-2pq)}}{p^2}. \qquad (4)$$

Нашу задачу розв'язано. Дійсно, якщо точка M і площа S нам дані, то p, q, S нам відомі. З формули (4) знаходимо k. Підставляючи його у вираз

$$b = q - kp,$$

знаходимо b. Підставляючи знайдені значення k і b в рівняння (2), знаходимо рівняння шуканої прямої. Після цього неважко побудувати і саму пряму.

Розглянемо числовий приклад.

З а д а ч а. Дано точку $M(1, 8)$. Провести через неї пряму, яка утворює з осями координат трикутник OAB з площею $S=18$ кв. од.

Розв'язуємо цю задачу за знайденими формулами, беручи до уваги, що $p = 1$, $q = 8$, $S = 18$. Маємо:

$$k = \frac{1\cdot 8 - 18 \pm \sqrt{18(18 - 2\cdot 1\cdot 8)}}{1} = -10 \pm 6,$$

або

$$k_1 = -4, \quad k_2 = -16.$$

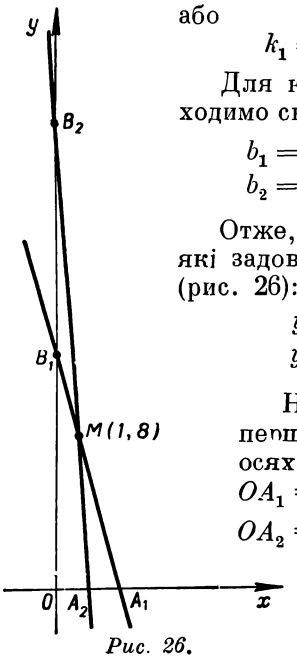


Рис. 26.

Для кожного із значень k знаходимо своє b:

$$b_1 = 8 - (-4)\cdot 1 = 12,$$
$$b_2 = 8 - (-16)\cdot 1 = 24.$$

Отже, дістаємо дві прямі, які задовольняють умови задачі (рис. 26):

$$y = -4x + 12,$$
$$y = -16x + 24.$$

Неважко підрахувати, що перша пряма відтинає на осях координат відрізки $OA_1 = 3$ і $OB_1 = 12$, а друга $OA_2 = \frac{3}{2}$, $OB_2 = 24$.

В обох випадках площі трикутників OA_1B_1 і OA_2B_2 однакові:

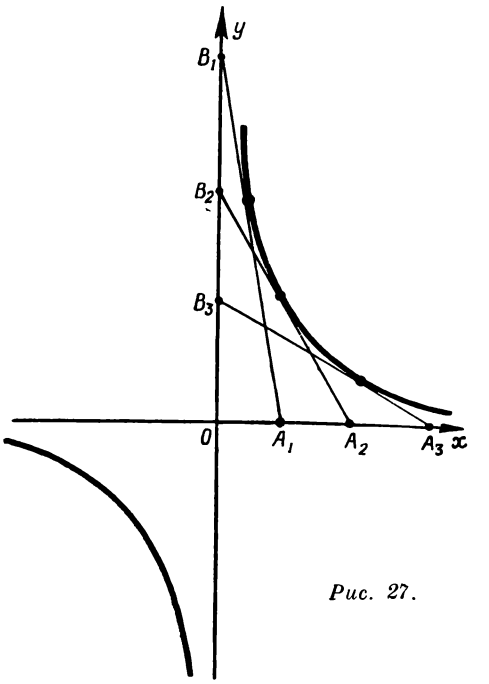


Рис. 27.

$$S_1 = \frac{OA_1 \cdot OB_1}{2} = 18, \quad S_2 = \frac{OA_2 \cdot OB_2}{2} = 18.$$

Однак цим задача не закінчується: становить великий інтерес дослідити знайдені розв'язки. Як ми бачимо з формули (4), задача може мати два розв'язки, якщо

$$S - 2pq > 0$$

(S — величина додатна, і тому перший множник під знаком радикала ми відкинули. Величини p і q теж додатні). Цей випадок ми мали в нашому числовому прикладі.

Задача не матиме жодного розв'язку (тобто шуканих прямих зовсім не буде), якщо

$$S - 2pq < 0,$$

і задача матиме тільки один розв'язок (шукана пряма буде тільки одна), якщо

$$S - 2pq = 0.$$

Цікаво з'ясувати, в чому полягає геометричний смисл цих умов. В яких випадках ми матимемо два, один або ні одного розв'язку?

Не наводячи повних доведень, ми спинимося тут тільки на з'ясуванні суті справи.

Читачеві добре знайомий графік обернено пропорціональної залежності (рис. 27), що задається рівнянням:

$$y = \frac{a}{x} \text{ (при } a > 0).$$

Графік, побудований за цим рівнянням, є крива — гіпербола.

Ця гіпербола має цікаву властивість. Якщо проводити дотичні до гіперболи в будь-якій її точці, то виявляється, що площі всіх трикутників, утворених дотичними і осями координат, будуть однакові і дорівнюватимуть $2a$, тобто

$$S = \text{пл. } \triangle OA_1B_1 = \text{пл. } \triangle OA_2B_2 = \text{пл. } \triangle OA_3B_3 = \\ = \ldots = 2a \qquad (5)$$

(a — це та сама величина, яка стоїть у чисельнику правої частини рівняння гіперболи).

Можна твердити, що й навпаки, якщо ми будуватимемо прямі, які утворюватимуть з осями координат трикутники: $\triangle OA_1B_1$, $\triangle OA_2B_2$, $\triangle OA_3B_3$ і т. д. однакової площі S, то всі ці прямі дотикатимуться деякої гіперболи

$$y = \frac{a}{x}.$$

При цьому величина a для цієї гіперболи дорівнюватиме половині площі трикутника, як це виходить з наведеної вище рівності (5). Справді, якщо

$$S = 2a, \quad \text{то} \quad a = \frac{S}{2}$$

і рівняння нашої гіперболи набере вигляду

$$y = \frac{S}{2x}.$$

Звідси з'ясовується і смисл підкореневого виразу у формулі (4), яка визначає значення k.

У нашій задачі було дві умови: шукана пряма проходить через точку $M(p, q)$ і утворює з осями координат трикутник OAB площі S.

Якщо ми тимчасово відкинемо першу умову, то можемо сказати, що всі прямі, які утворюють з осями координат трикутники OAB заданої площі S, дотикатимуться деякої гіперболи, побудованої за рівнянням

$$y = \frac{S}{2x}.$$

Тепер додамо першу умову. Тоді нам стане відразу ясно, що коли точка $M(p, q)$, через яку повинна проходити наша пряма, лежить м і ж осями і гіперболою (точка M_1), то через неї пройдуть д в і шукані прямі, дотичні до гіперболи (рис. 28). Якщо ж точка M (точка M_2) опиниться на самій гіперболі, то через неї пройде тільки о д н а шукана пряма, дотична до гіперболи в точці M_2.

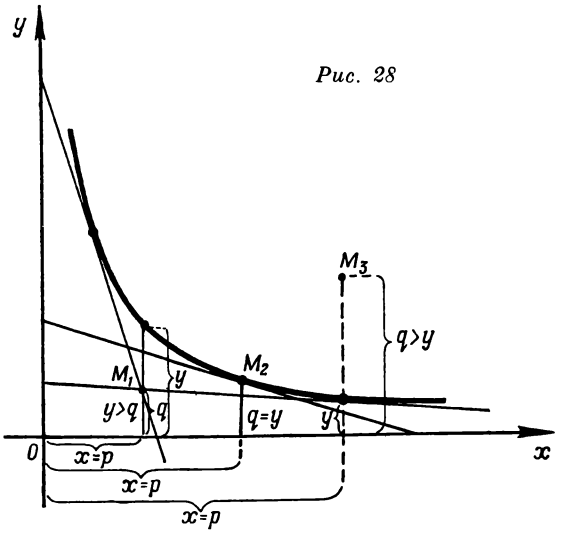


Рис. 28

І, нарешті, якщо точка M (точка M_3) лежатиме всередині гіперболи, то через неї не пройде ж о д н а шукана пряма, бо з точки M_3 не можна провести дотичних до гіперболи. Тепер неважко пояснити смисл знака підкореневого виразу $S - 2pq$, від якого залежить число розв'язків нашої задачі.

Якщо точка M лежить на самій гіперболі, то, задавши її абсцису $x = p$, ми дістанемо з рівняння гіперболи її ординату y за формулою

$$y = \frac{S}{2p}.$$

Якщо наша точка $M_2(p, q)$ лежить на гіперболі, то її ордината q дорівнює y, знайденому з рівняння гіперболи.

Маємо:

$$y = \frac{S}{2p} = q,$$

$$S = 2pq, \text{ або } S - 2pq = 0.$$

У цьому випадку ми дістаємо один розв'язок нашої задачі — одну шукану пряму (рис. 28).

Якщо точка $M_1(p, q)$ лежить між осями і гіперболою, то її ордината q менша y, знайденого з рівняння гіперболи, тобто

$$q < y = \frac{S}{2p},$$

$$\frac{S}{2p} > q, \text{ або } S - 2pq > 0,$$

і ми маємо два розв'язки нашої задачі.

Нарешті, якщо наша точка $M_3(p, q)$ лежить всередині гіперболи, то q більше y, знайденого з рівняння гіперболи, тобто

$$q > y,$$
$$q > \frac{S}{2p}, \text{ або } S - 2pq < 0,$$

і наша задача не має розв'язків.

Але це і є ті самі умови, які ми дістали, досліджуючи підкореневий вираз у формулі (4).

СЛИМАК ПАСКАЛЯ

Розглянемо тепер криву, що називається слимаком Паскаля на честь відомого французького фізика і математика Блеза Паскаля (1623—1662), і покажемо, як його використовують для розв'язування важких геометричних задач. Щоб дістати слимак Паскаля, зробимо так. Візьмемо коло радіуса a і на ньому деяку точку A (рис. 29). Навколо точки A обертатимемо промінь AC. Нехай його друга точка перетину з колом буде точка B. По обидва боки від точки B відкладатимемо на промені один і той же відрізок b. Геометричне місце кінців цих відрізків M і M' і буде слимаком Паскаля.

Складемо рівняння слимака Паскаля. Для цього візьмемо систему координат (рис. 30) і побудуємо коло радіуса a з центром у точці $P(a, 0)$. Точку A — центр обертання — розмістимо у початку координат. Нехай кінцями відрізка b, відкладеного від точки B, будуть точки M і M'. Вони будуть змінними точками слимака Паскаля. Позначимо координати змінної точки M через x і y. (При виведенні рівняння заради спрощення ми розглядатимемо тільки одну точку M. Можна довести, що і в цьому випадку ми дістанемо рівняння в с ь о г о слимака Паскаля).

Для того щоб вивести рівняння слимака, треба алгебраїчно записати через координати

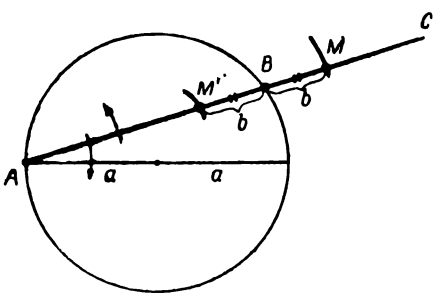


Рис. 29.

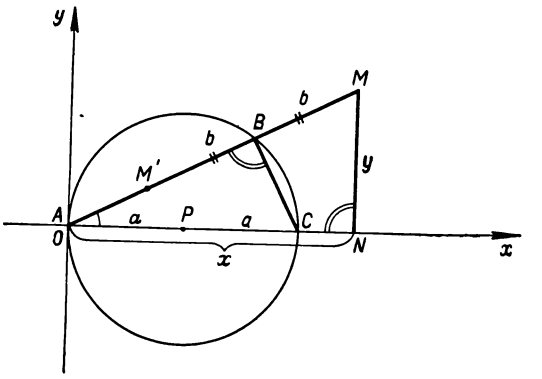


Рис. 30.

x і y змінної його точки ту властивість, яка його визначає.

З рис. 30 видно, що трикутники ABC і ANM подібні, бо кути ABC і ANM прямі. Маємо:

$$\frac{AB}{AC} = \frac{AN}{AM}.$$

Але

$$AM = \sqrt{x^2 + y^2},\ AN = x,\ AC = 2a,$$
$$AB = AM - BM = AM - b = \sqrt{x^2 + y^2} - b.$$

Звідси можемо записати:

$$\frac{\sqrt{x^2 + y^2} - b}{2a} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

Позбуваючись знаменника, знаходимо:

$$x^2 + y^2 - b\sqrt{x^2 + y^2} = 2ax.$$

Переносимо радикал у праву частину рівності, а $2ax$ — у ліву; дістанемо:

$$x^2 + y^2 - 2ax = b\sqrt{x^2 + y^2}.$$

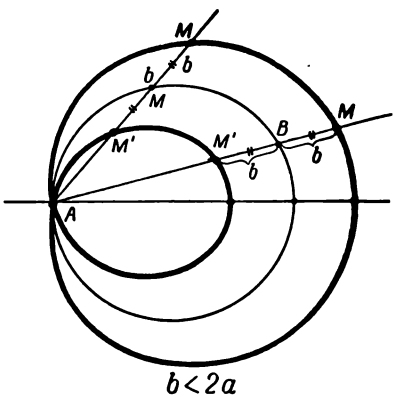
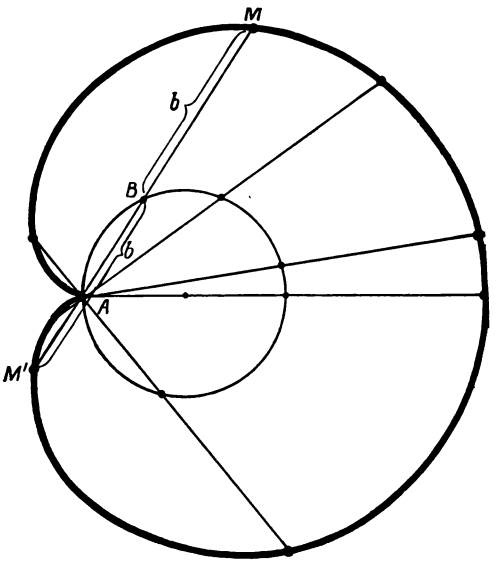
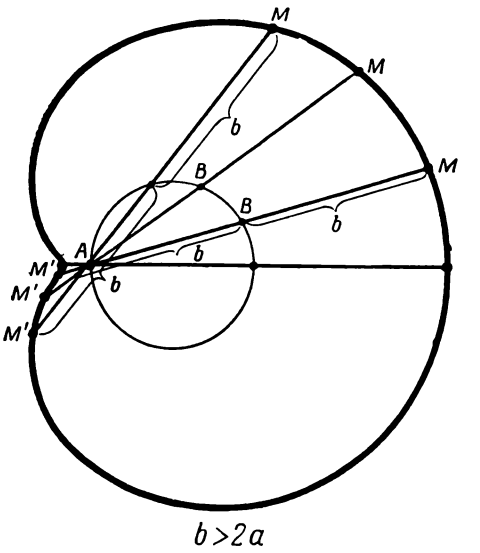


Рис. 31.



$b=2a$ *Рис. 32*



$b>2a$ *Рис. 33.*

Щоб позбутися знака радикала, підносимо обидві частини рівняння до квадрата. Знаходимо:

$$(x^2 + y^2 - 2ax)^2 = b^2(x^2 + y^2).$$

Це і є рівняння слимака Паскаля. На рис. 31, 32, 33 побудовано три слимаки Паскаля, згідно з трьома можливими випадками: $b<2a$, $b=2a$, $b>2a$. (Для цієї побудови величинам a і b були надані деякі числові значення, рівняння було розв'язано відносно y, складена таблиця значень x і y, після чого за точками побудована кожна крива).

Особливо цікавий той випадок, коли $b = a$. Такий слимак використовується для розв'язання задачі про трисекцію кута.

ТРИСЕКЦІЯ КУТА З ДОПОМОГОЮ СЛИМАКА ПАСКАЛЯ

Поділити кут пополам (з допомогою побудови бісектриси), як всім добре відомо, дуже просто. Однак задача про поділ довільного кута на три рівні частини (трисекція кута) дуже складна. Ще стародавні геометри намагалися її розв'язати, виконуючи для цього різноманітні побудови з допомогою лінійки і циркуля. Однак хоч би які складні побудови вони придумували, задача не піддавалася їх зусиллям. Кінець кінцем вони прийшли до висновку, що такі інструменти, як лінійка і циркуль, з допомогою яких можна накреслити тільки пряму і коло, **недостатні** для розв'язання цієї задачі. Тому було запропоновано використати для її розв'язання нові інструменти, якими можна креслити інші, складніші криві. Так, грецький геометр II ст. до н. е. Нікомед винайшов інструмент, що називається «конхоїдальним циркулем», яким можна креслити криву **конхоїду**. З її допомогою довільний кут можна поділити на три рівні частини. Зараз ми покажемо, як можна поділити довільний кут на три рівні частини за допомогою слимака Паскаля, який можна побудувати як з допомогою таблиці за його рівнянням (це ми щойно бачили), так і з допомогою спеціального інструмента.

Насамперед зауважимо, що деякі **певні** кути можна поділити на три рівні частини дуже легко і звичайними інструментами — лінійкою та циркулем. Наприклад, прямий кут ділять на три рівні частини так. Будують прямокутний трикутник, один з катетів якого (AB) дорівнює половині гіпотенузи (BC). Кут, протилежний цьому катету, дорівнюватиме 30°, тобто $\frac{1}{3}$ прямого кута (рис. 34).

Неможливість поділу довільного кута на три рівні частини з допомогою тільки лінійки і циркуля була строго доведена (з використанням системи координат та рівнянь кривих) лише в XIX ст.

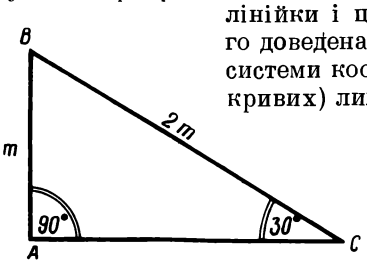


Рис. 34

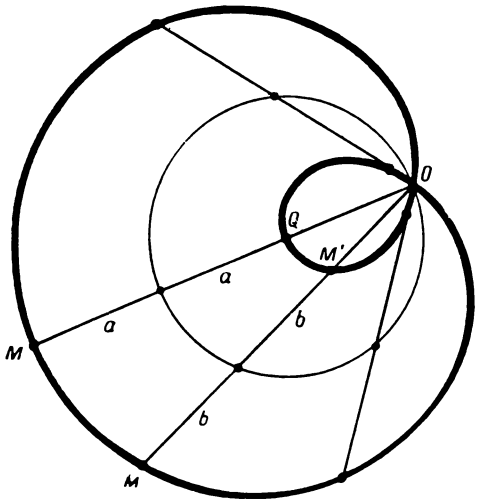


Рис. 35.

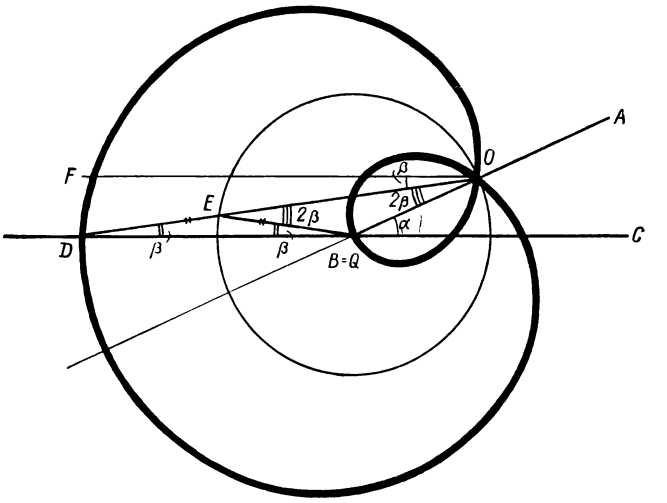


Рис. 36

Тепер покажемо, як ділиться на три рівні частини довільний кут з допомогою слимака Паскаля.

Нехай нам дано довільний кут α. Треба поділити його на три рівні частини. Припустимо, що у нас на кальці або на прозорій пластинці з пластмаси накреслено слимак Паскаля при $b = a$ (рис. 35). Накладемо цього слимака на кут α так (рис. 36), щоб його точка Q збіглася з вершиною кута B, а відрізок OQ (радіус твірного круга слимака) пішов по стороні BA. Продовжимо сторону BC за вершину B до перетину із слимаком у точці D. Сполучимо точки O і D.

Доведемо, що кут ODC і є шуканий, тобто $\angle ODC = \frac{\alpha}{3}$. Для доведення: 1) сполучимо точку E (в якій твірний круг перетинається з відрізком OD) з точкою B; 2) через точку O проведемо пряму OF, паралельну прямій BC. Тоді $\angle FOB = \angle ABC = \alpha$. Позначимо $\angle ODB$ через β. Тоді: 1) $\angle EBD = \beta$, бо за властивістю слимака $BO = BE = ED = a$ і трикутник DEB — рівнобедрений; 2) $\angle OEB = 2\beta$, як зовнішній кут трикутника DEB; 3) $\angle BOE = 2\beta$, як кут при основі рівнобедреного трикутника OBE; 4) $\angle DOF = \angle ODC = \beta$, як внутрішні різносторонні кути при паралельних OF і DC. Звідси маємо: 5) $\angle FOB = 3\beta = \angle OBC = \alpha$, як внутрішні різносторонні при тих же паралельних. Але якщо $3\beta = \alpha$, то $\beta = \frac{\alpha}{3}$, і правильність розв'язання задачі доведено. Отже, кут α поділено на три рівні частини з допомогою слимака Паскаля.

На закінчення нашої розповіді про систему координат та її використання в геометрії ми можемо зробити такі висновки. Ми бачили, що система координат дає змогу будувати графіки різноманітних залежностей і цим полегшує їх розуміння та використання; за заданими властивостями ліній дозволяє знаходити їх рівняння і навпаки, знаючи рівняння, будувати за ними графіки та вивчати їх властивості. Вона дає *загальні способи* для розв'язання багатьох геометричних задач і доведень теорем, зводячи їх до обчислювальних задач, які розв'язуються за загальними правилами алгебри.

Система координат дозволяє використовувати в техніці властивості різних ліній. Нехай, наприклад, треба розрахувати на міцність яку-небудь балку, що горизонтально лежить у споруді (наприклад, балку моста, стельового перекриття і т. д.).

Розв'язуючи цю задачу, інженер використовує *рівняння лінії*.

Він робить так: виходячи з навантаження, яке повинна витримати балка, інженер складає, за правилами механіки, *рівняння лінії*, по якій прогинається балка. Знаючи це рівняння, він вже легко розраховує всі необхідні розміри балки.

Система координат знаходить найважливіші застосування не тільки майже в усіх математичних науках, але й у тих науках, де використовується математика. Так, майже всі розрахунки в механіці, астрономії, геодезії, географії грунтуються на системі координат. Досить сказати, що меридіани і паралелі, які ми бачимо на будь-якій географічній карті або на глобусі, становлять систему так званих *криволінійних координат*.

Справді, положення точки на земній кулі задається двома числами — широтою і довготою, тобто двома координатами, а самі паралелі і меридіани — криві координатні лінії.

Сміливо можна сказати, що величезна більшість розрахунків, виконуваних у техніці, використовує систему координат.

Декартова система координат, про яку ми тут говорили, — не єдина. Існують і інші системи координат: афінна, полярна і т. д.

Систему координат можна побудувати і в просторі для розв'язання задач стереометрії.

Усі питання, зв'язані із застосуванням системи координат на площині і в просторі, вивчає розділ математики, який називається аналітичною геометрією. Тут ми спинилися лише на найпростіших питаннях. Повний курс аналітичної геометрії вивчають студенти фізико-математичних факультетів університетів і технічних вузів.

ФУНКЦІЇ У ПРИРОДІ І ТЕХНІЦІ

Одним з найважливіших понять у математиці та її застосуваннях є поняття функції. Скрізь, де є величини, зв'язані так, що із зміною одних змінюються інші, ми маємо справу з функціями. Площа квадрата є функцією довжини його сторони; шлях, пройдений тілом при вільному падінні, — функцією часу, що минув від початку падіння; величина струму — функцією від напруги струму та опору кола і т. д. Найчастіше функціональна залежність виражається формулою (проте це не завжди так: температура повітря є функція від часу, бо з часом температура змінюється, а формули, що зв'язує їх, не існує). Для багатьох питань фізики досить лінійної і квадратичної функцій. Наприклад, швидкість при рівноприскореному русі виражається лінійною функцією $v = at$, а пройдений шлях — квадратичною функцією $s = \frac{at^2}{2}$. Але є випадки, де потрібні інші функції. Особливо часто зустрічаються показникова і тригонометричні функції. Ми розповімо про деякі з таких випадків.

ЧИСЛО *e*. НАТУРАЛЬНІ ЛОГАРИФМИ

При записі законів фізики, зв'язаних з показниковою функцією, зручно користуватися спеціальним числом, яке називається числом *e*. Це число можна визначити так. Нарисуємо графіки функцій $y = a^x$ при різних значеннях основи a. Чим більша ця основа, тим крутіше піднімаються вгору графіки (рис. 1). Ці графіки в точці $A\,(0,\ 1)$ під різними кутами перетинають вісь Oy. Наприклад, кут між віссю Oy і кривою $y = 2^x$ дорівнює приблизно 55°15′, а для кривої $y = 3^x$ цей кут дорівнює приблизно 42°20′. Тому знайдеться таке число e, яке лежить між 2 і 3, що крива $y = e^x$ перетне вісь Oy під кутом 45°.

Точніші підрахунки показують, що число e дорівнює 2,71828... Логарифми за основою e називаються натуральними логарифмами. Вони позначаються $\ln x$. Якщо ми знаємо десятковий логарифм числа, то його натуральний логарифм можна знайти за формулою $\ln x = \frac{\lg x}{M}$, де $M = 0{,}43429...$

ОДНА ЛЮДИНА МОЖЕ ВДЕРЖАТИ КОРАБЕЛЬ

Коли корабель підходить до берега, з нього кидають на пристань канат. Тут його обмотують кілька разів навколо стовпа і таким способом удержують ним корабель, що зупиня-

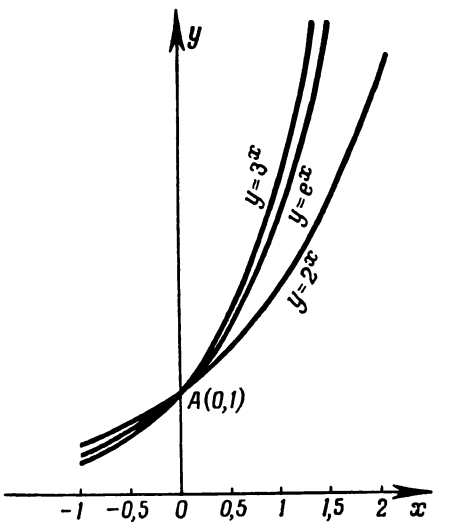
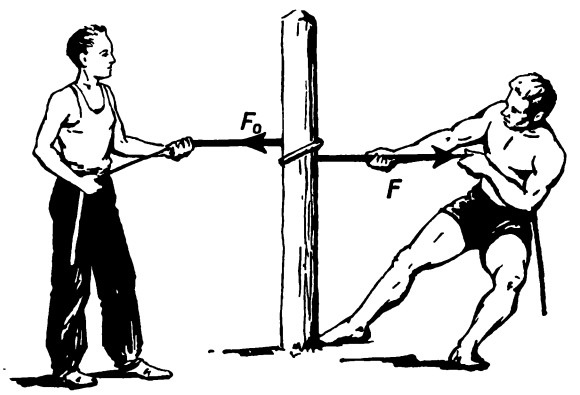


Рис. 1.

Одна людина може удержати корабель.

ється. Як же вдається одній людині удержати корабель? Виявляється, їй допомагає сила тертя. Якщо обмотати канат один раз навколо стовпа, то через тертя каната об стовп можна удержати силою F_0 силу F, більшу, ніж F_0 в a раз. Відношення $\frac{F}{F_0} = a$ залежить від матеріалу, з якого зроблені канат і стовп. Наприклад, якщо канат конопляний, а стовп залізний, то $a = 3{,}5$. Інакше кажучи, силою в 100 *кГ* можна зрівноважити (використовуючи «допомогу» сили тертя) силу в 350 *кГ*. Кожен новий оберт каната навколо стовпа збільшує відношення сил ще в a раз. Таким чином, якщо обмотати канат два рази, то відношення удержуваної та удержуючої сили дорівнюватиме a^2, а якщо три рази, то $\frac{F}{F_0} = a^3$. Взагалі, якщо число обертів дорівнює x (x може і не бути цілим числом), то $\frac{F}{F_0} = a^x$. Якщо обмотати конопляний канат навколо залізного стовпа два рази, то силою в 100 *кГ* можна зрівноважити силу приблизно в 1,2 T, а при триразовому обмотуванні — силу в 4,2 T.



Силач не може перетягти каната, який без особливого напруження тримав другий чоловік.

КАНАТ РІВНОГО ОПОРУ НА РОЗРИВ

Канати, на яких опускають вантаж у шахти, невигідно робити однакової товщини на всій їх довжині. Адже верхні частини каната повинні удержувати і вагу вантажу, і вагу нижніх частин каната, а нижні частини повинні удержувати лише вантаж, що опускається. Найкраще надати канатові такої форми, щоб у будь-якому його перерізі на 1 *см*^{2} припадало однакове навантаження. Розрахунки показують, що для цього площа перерізу каната повинна змінюватися за таким законом:

$$S = S_0 e^{\frac{\gamma S_0 x}{P}},$$

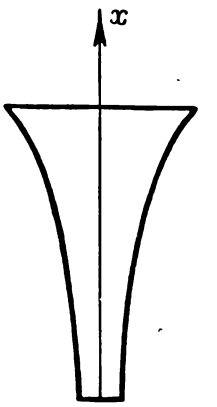


Рис 2

де S_0 — площа нижнього перерізу каната; S — площа перерізу на відстані x від нижнього перерізу; γ — питома вага матеріалу, з якого зроблено канат; P — вага вантажу, що опускається. Вертикальний розріз такого каната має форму, зображену на рис. 2. Такий канат називають канатом рівного опору на розрив. Канат рівного опору на розрив має менший об'єм, ніж канат з сталим перерізом, розрахований на таке ж навантаження, тому на нього витрачається менше матеріалу.

РАДІОАКТИВНИЙ РОЗПАД РЕЧОВИНИ

Коли радіоактивна речовина розпадається, її кількість зменшується. Через деякий час залишиться половина початкової кількості речовини. Цей проміжок часу t_0 називається періодом піврозпаду речовини. Якщо мине ще t_0 років, то з половини, яка залишилася, розпадеться ще половина речовини і залишиться тільки чверть початкової кількості. Взагалі через t років маса m речовини дорівнюватиме:

$$m = M\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_0}},$$

де M — початкова маса речовини. Чим більший період піврозпаду, тим повільніше розпадається речовина. Наприклад, для урану-238 період піврозпаду дорівнює 4,5 млрд. років. Значить, за весь час існування Землі не розпалося ще й половини початкового запасу

урану. А ось у радію період півроспаду дорівнює всього 1590 рокам. Коли б мільйон років тому вся Земля складалася з радію, то тепер від неї не залишилося б жодного атома радію. А існує він лише тому, що при розпаді урану весь час з'являються нові атоми радію.

ВМИКАННЯ І ВИМИКАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Якщо повернути вимикач, то в ту ж мить засвічується електрична лампочка. Ми настільки звикли до цього, що не задумуємося

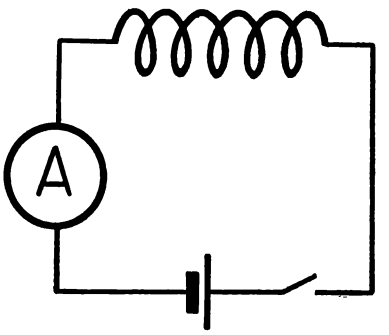


Рис. 3.

над тим, чи відразу величина струму набуває свого максимального значення. Однак якщо скласти таку електричну схему, як показано на рис. 3, і увімкнути струм, то через наявність котушки величина струму зростатиме повільно, бо в колі виникне струм самоіндукції, напрямлений у протилежний бік. Розрахунки показують, що залежність величини струму I від часу виражається такою формулою:

$$I = \frac{V_0}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}).$$

Тут R — опір кола, L — самоіндукція котушки, V_0 — напруга струму. Поглянемо, що відбуватиметься з величиною струму з часом. Функцію $e^{-\frac{R}{L}t}$ можна записати у вигляді $\left(\frac{1}{e}\right)^{\frac{R}{L}t}$. Але величина $\frac{1}{e}$ менша від одиниці, а відомо, що показникова функція прямує до нуля із зростанням показника, якщо її основа менша від одиниці. Тому від'ємник $e^{-\frac{R}{L}t}$ у формулі для величини струму зменшуватиметься, наближатиметься до нуля, і через деякий час величина струму майже точно дорівнюватиме $\frac{V_0}{R}$. Це і є те значення, яке відоме із закону Ома. Різниця між величиною струму і значенням $\frac{V_0}{R}$ стане такою маленькою, що жодні прилади її не покажуть.

Насправді те саме відбувається при вмиканні струму і без котушки самоіндукції. Але в цьому випадку самоіндукція L настільки мала, що функція $e^{-\frac{R}{L}t}$ майже миттю стає дуже малою.

Процес вимикання постійного струму подібний до процесу його вмикання. Він описується навіть простішою формулою:

$$I = \frac{V_0}{R}e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Ми вже говорили, що функція $e^{-\frac{R}{L}t}$ спадає і прямує до нуля, а тому через деякий час після вимикання струму прилади покажуть, що в колі струму немає.

ОСТИГАННЯ ЧАЙНИКА

Ви, звичайно, помічали, що коли зняти киплячий чайник з вогню, то спочатку він швидко остигає, а потім остигання відбувається набагато повільніше. Справа в тому, що швидкість остигання пропорціональна різниці між температурою чайника і температурою навколишнього повітря, і чим менша стає ця різниця, тим повільніше остигає чайник. Якщо спочатку температура чайника дорівнювала T_0, а температура повітря дорівнювала T_1, то через t секунд температура T чайника виразиться формулою:

$$T = (T_0 - T_1)e^{-kt} + T_1,$$

де k — число, яке залежить від форми чайника і матеріалу, з якого його зроблено, та кількості води, що є в ньому.

Чим більший чайник, тим значення k менше і тим повільніше він остигає.

ЧОМУ ПАРАШУТИСТ ПАДАЄ РІВНОМІРНО

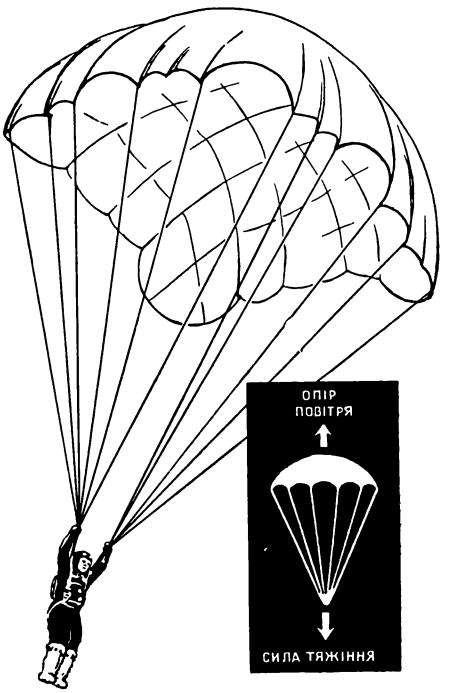
При падінні тіл у безповітряному просторі швидкість їх безперервно зростає. При падінні тіл у повітрі швидкість падіння теж збільшується, але не може перевищити певної величини.

Розглянемо падіння парашутиста. Коли вважати, що сила опору повітря пропорціональна швидкості падіння парашутиста, тобто що $F = kv$, то через t секунд швидкість падіння дорівнюватиме:

$$v = \frac{mg}{k}\left(1 - e^{-\frac{kt}{m}}\right)$$

(m — маса парашутиста). Зверніть увагу на схожість цієї формули з формулою для величини струму. Через деякий проміжок часу $e^{-\frac{kt}{m}}$ стане дуже маленьким числом і швидкість падіння майже точно дорівнюватиме $\frac{mg}{k}$, тобто падіння стане майже рівномірним. Коефіцієнт пропорціональності k залежить від розмірів парашута.

Написана формула придатна не тільки для випадку падіння парашутиста, а й для вивчення падіння крапель дощової води, пушинки і т. д. З неї видно, що чим менше відношення $\frac{mg}{k}$, тим повільніше падає тіло. Цим і пояснюється, чому пушинка падає повільніше від каменя: у неї маленька маса, а площа поверхні досить велика, і повітря чинить значний опір падінню.



Парашутист опускається на землю рівномірно.

ЯК ВИМІРЮЮТЬ ВИСОТУ ЗА ДОПОМОГОЮ БАРОМЕТРА

Чим вище піднімаються на гору альпіністи, тим меншим стає тиск повітря. Цим можна скористатися для того, щоб з допомогою барометра визначати висоту піднімання. Як показують розрахунки, при сталій температурі повітря різниця висот двох точок виражається такою формулою:

$$h_2 - h_1 = \frac{p_0\,(t^\circ + 273{,}1)}{W_0} \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Тут p_1 і p_2—тиск повітря на висотах h_1 і h_2, p_0 — тиск повітря на рівні моря, W_0— вага 1 $м^3$ повітря при температурі 0° і тиску p_0, t° — температура повітря.

Ця формула вірна для не надто великих висот. Дослідження, проведені в Радянському Союзі за програмою Міжнародного геофізичного року за допомогою ракет, показали, що на великих висотах справедливі інші закони зміни тиску з висотою.

Взагалі будь-яка фізична формула має обмежену галузь застосування — вона вірна при одних умовах і перестає бути вірною при інших. Справа в тому, що при виведенні будь-якої фізичної формули робляться деякі припущення, які вірні лише приблизно. Коли ж ці припущення перестають бути вірними, формула втрачає силу.

СКІЛЬКИ ПАЛИВА ПОВИННА ВЗЯТИ РАКЕТА

Багато важких математичних задач доводиться розв'язувати в теорії міжпланетних мандрівок. Однією з них є задача про визначення кількості палива, потрібного для того, щоб надати ракеті відповідної швидкості v. Ця кількість M залежить від маси m самої ракети (без палива) і від швидкості v_0, з якою продукти горіння витікають з ракетного двигуна.

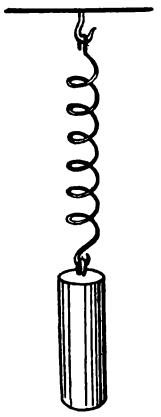
Якщо знехтувати опором повітря і притяганням Землі, то кількість палива визначиться формулою

$$M = m\left(e^{\frac{v}{v_0}} - 1\right)$$

(формула К. Е. Ціолковського). Наприклад, для того щоб ракеті з масою 1,5 *т* надати швидкості 8 *км/сек*, треба при швидкості витікання газів 2 *км/сек* взяти приблизно 80 *т* палива. Коли б вдалося збільшити швидкість витікання газів до 4 *км/сек*, то потрібно було б усього 10 *т* палива. Взагалі, чим з більшою швидкістю v_0 витікають гази з ракети, тим менше буде $e^{\frac{v}{v_0}}$ і тим менше потрібно буде палива. Інший спосіб зменшення кількості палива полягає в заміні одноступінчастих ракет багатоступінчастими (докладніше про ракети див. у статті «Радянські ракети та штучні супутники Землі»).

ГАРМОНІЧНІ КОЛИВАННЯ

Ми розглянули кілька прикладів з фізики і техніки, в яких так чи інакше зустрічається показникова функція. Зараз ми перейдемо до розгляду прикладів, пов'язаних з тригонометричними функціями. Ми почнемо з гармонічних коливань. Візьмемо, наприклад, гирю, підвішену на пружині, і штовхнемо її донизу. Спочатку гиря буде опускатися, розтягуючи пружину. Чим нижче опускатиметься гиря, тим сильніше буде тягти її вгору пружина. Нарешті, гиря витратить всю свою енергію на розтягування пружини і зупиниться. Тоді пружина потягне гирю вгору. Внаслідок інерції гиря не зупиниться в положенні рівноваги, а проскочить його і підніметься вгору настільки ж, наскільки вона опустилася вниз (насправді вона підніметься трохи менше через опір повітря і недостатню пружність пружини, але ми поки що не будемо це враховувати). Піднімаючись вгору, гиря буде стискувати пружину, і, коли гиря зупиниться під дією стиснутої пружини, вона почне опускатися донизу. В результаті гиря здійснюватиме коливання вгору і вниз. Графік цього коливання поданий на рис. 4. Ця крива називається синусоїдою.



Як показують розрахунки, відхилення гирі від стану рівноваги виражається формулою:

$$s = \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t.$$

Тут v_0 — швидкість, з якою ми штовхнули гирю, а $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$, де m — маса гирі і k — жорсткість пружини (сила, яка потрібна, щоб розтягти пружину на 1 *см*). Коливання, які відбуваються за законом

$$s = A \sin \omega t, \qquad (1)$$

називаються синусоїдальними, або гармонічними. Ми можемо дістати уявлення про такі коливання, стежачи за рухом точки, яка рівномірно обертається, і спостерігаючи цей рух одним оком збоку (так, що око спостерігача перебуває у площині обертання). Нам здаватиметься, що точка не обертається, а рухається то в один бік, то в інший. Таку картину спостерігають астрономи, стежачи за рухом супутників Юпітера, коли Земля перебуває в площині орбіти цих супутників.

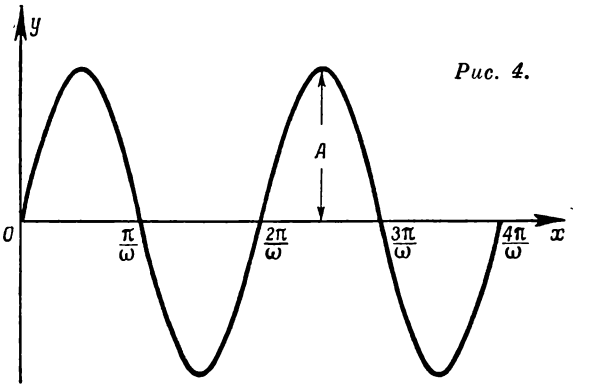


Рис. 4.

Число A, яке називається амплітудою синусоїдального коливання, показує розмах цього коливання, а число ω, що називається частотою коливання, показує, скільки коливань відбувається за 2π сек. (тобто приблизно за $\frac{44}{7}$ сек.). Кожні $\frac{2\pi}{\omega}$ сек. гиря повертатиметься у вихідне положення. Тому період її коливання дорівнює $\frac{2\pi}{\omega}$.

Якщо ми спочатку відхилимо гирю на s_0 *см*, а потім штовхнемо її з швидкістю v_0, то вона коливатиметься за складнішим законом:

$$s = A \sin (\omega t + \alpha). \qquad (2)$$

Розрахунки показують, що амплітуда A цього коливання дорівнює $\sqrt{s_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}}$, а число α таке, що $\operatorname{tg} \alpha = \frac{s_0 \omega}{v_0}$. Через доданок α це коливання відрізняється від коливання

$$s = A \sin \omega t.$$

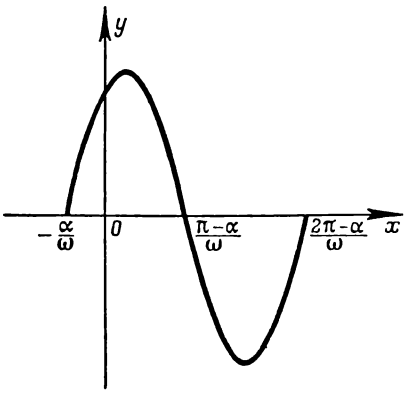


Рис. 5. Графік коливального руху в початковою фазою.

На рис. 4 і 5 ми зобразили графіки обох коливань. Графік коливання (2) виходить з графіка коливання (1) зсувом вліво на $\frac{\alpha}{\omega}$. Число α називають початковою фазою.

КОЛИВАННЯ МАЯТНИКА

Коливання маятника теж наближено відбуваються за синусоїдальним законом. Якщо ці коливання малі, то кут відхилення маятника наближено виражається формулою:

$$\varphi = \sin \varphi_0 t \sqrt{\frac{g}{l}},$$

де l — довжина маятника, а φ — найбільший кут відхилення. Чим довший маятник, тим повільніше він коливається. Вимірюючи період коливання маятника певної довжини, можна обчислювати прискорення земного тяжіння в різних точках земної поверхні.

РОЗРЯДЖАННЯ КОНДЕНСАТОРА

Не тільки багато які механічні коливання відбуваються за синусоїдальним законом. І в електричних колах виникають синусоїдальні коливання. Замкнемо, наприклад, коло, зображене на рис. 6. Величина струму в цьому колі змінюватиметься за синусоїдальним законом:

$$I = I_0 \sin (\omega t + \alpha).$$

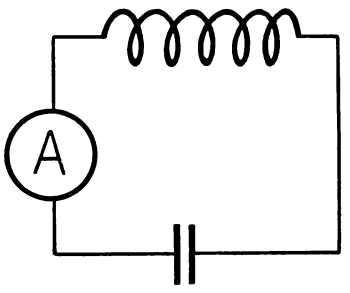


Рис. 6.

Частота α коливань величини струму дорівнює $\frac{1}{\sqrt{LC}}$, де C — ємність конденсатора, а L — самоіндукція кола. Цей закон дуже подібний до закону коливань гирі, тільки замість жорсткості пружини треба взяти величину, обернену ємності конденсатора, а замість маси гирі — самоіндукцію котушки.

НАПРУГА ЗМІННОГО СТРУМУ

Коли рамка, зображена на рис. 7, рівномірно обертається в однорідному магнітному полі, то в ній виникає змінний струм. Напруга цього струму виражається формулою

$$V = \omega SH \sin \omega t,$$

де S — площа рамки, H — напруженість магнітного поля, ω — кутова швидкість обертання рамки, t — час.

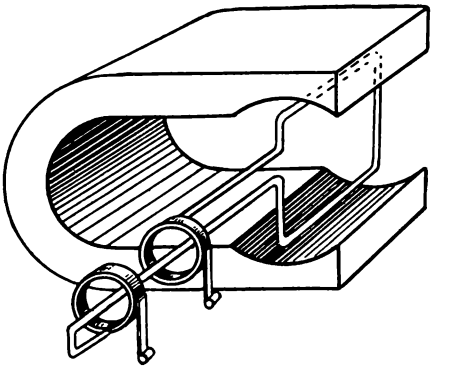
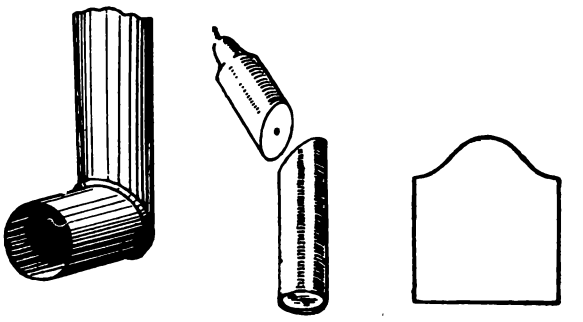


Рис. 7.

ЯК З'ЄДНАТИ ДВІ ТРУБИ

Наведені приклади можуть створити враження, що синусоїди зустрічаються тільки у зв'язку з коливаннями. Однак це не так. На-



Щоб мати рівний зрів труби, треба її край вирівати по синусоїді.

приклад, синусоїди використовуються при з'єднанні двох циліндричних труб під кутом одна до одної. Щоб з'єднати дві труби таким способом, треба зрізати їх навскоси. Якщо розгорнути зрізану навскоси трубу, то вона буде обмежена зверху синусоїдою. В цьому можна переконатися, обгорнувши свічку папером, зрізавши її навскоси і розгорнувши папір. Тому, щоб дістати рівний зріз труби, можна спочатку обрізати металевий лист зверху по синусоїді, а потім згорнути його в трубу.

ЯК ВИГИНАЄТЬСЯ КОЛОНА

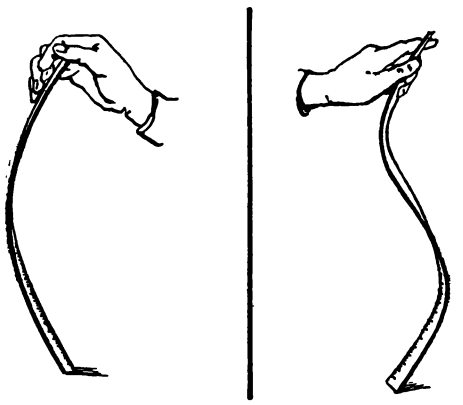
Синусоїда зустрічається при розгляді згину колони під дією вертикального навантаження. Якщо навантаження дуже мале, колона не згинається зовсім. Але якщо навантаження досягає деякого значення, що називається критичним, то колона почне згинатися, причому її вісь набере форми синусоїди. В цьому можна переконатися на досвіді, згинаючи замість колони металеву лінійку. Критична сила дорівнює

$$F = \frac{\pi^2 EI}{l^2},$$

де l — висота колони, а числа E і I залежать від матеріалу колони та розмірів її перерізу. З формули видно, що чим вища колона, тим менша сила потрібна, щоб її зігнути. Це також можна перевірити з допомогою лінійки.

Якщо замість сили F, що дається формулою, прикласти вчетверо більшу силу, то лінійка зігнеться не у вигляді півхвилі синусоїди, а у вигляді цілої хвилі синусоїди.

Формула критичної сили була відкрита великим математиком Л. Ейлером.



Лінійка згинається по синусоїді.

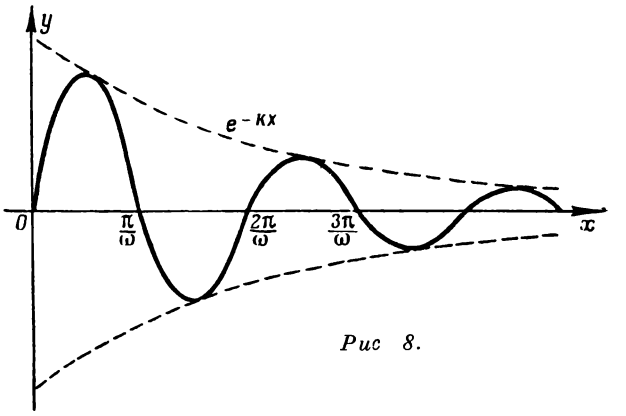


Рис 8.

ЗАГАСАЮЧІ КОЛИВАННЯ

Досі, говорячи про коливання маятника, гирі, що хитається на пружині, і т. д., ми нехтували опором повітря. Насправді через опір повітря амплітуда коливань стає чимраз меншою, коливання загасають. Шлях, який проходить точка, що здійснює загасаючі коливання, виражається такою формулою:

$$s = Ae^{-kt} \sin(\omega + t\alpha).$$

Через те що множник e^{-kt} зменшується з часом, то розмах коливань стає чимраз меншим. Після кожного повного коливання амплітуда зменшується в $e^{\frac{2\pi k}{\omega}}$ раз. Число $\frac{2\pi k}{\omega}$ називається логарифмічним декрементом загасаючого коливання. Чим більший логарифмічний декремент, тим швидше загасають коливання. Через деякий час вони стануть такими маленькими, що прилади покажуть повне зупинення тіла. Графік загасаючого коливання поданий на рис. 8.

Якщо опір середовища дуже великий (скажімо, якщо маятник коливається не в повітрі, а в маслі), то коливань не буде зовсім — виведений з стану рівноваги маятник повільно опускатиметься, наближаючись до стану рівноваги. В цьому випадку закон його руху задається формулою виду

$$s = A_1 e^{-k_1 t} + A_2 e^{-k_2 t},$$

де числа A_1 і A_2 залежать від початкового положення і початкової швидкості маятника.

При електричних коливаннях також відбуваються загасаючі коливання через наявність опору кола.

ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ

Розглянемо знову гирю, що хитається на пружині. Якщо не перешкоджати їй хитатися, то вона здійснюватиме коливання з певною частотою ω. Ця частота називається власною частотою коливань гирі. Зовсім по-іншому виглядатимуть коливання гирі, якщо ми будемо розхитувати її. Нехай розхитувальна сила сама змінюється за синусоїдальним законом, тобто то тягне гирю то вгору, то вниз. Тоді гиря здійснюватиме коливання, що утворюються при додаванні двох коливань. Одне з них відбувається з власною частотою коливань гирі, а друге — з частотою розхитувальної сили. Якщо на початку коливань гиря перебуває в стані спокою і розхитувальна сила змінюється за законом $F = A \sin \beta t$, то закон руху гирі виразиться формулою:

$$s = \frac{A}{\omega^2 - \beta^2}\left[\sin \beta t - \frac{\beta}{\omega} \sin \omega t\right], \qquad (3)$$

де ω — власна частота коливань гирі. Графік шляху гирі має вже досить складний вигляд. Справа в тому, що функції $\sin \beta t$ і $\sin \omega t$ змінюються з різною частотою. Тому іноді два коливання, в яких бере участь гиря, напрямлені в різні боки (так буде, наприклад, на початку коливань), і тоді ці коливання гасять одне одного. Іноді ж вони напрямлені в один бік, і тоді вони підсилюють одне одного.

Найбільша амплітуда коливань дорівнює приблизно $\left|\frac{A}{\omega(\omega - \quad)}\right|$. Звідси видно, що коли β мало відрізняється від ω (тобто якщо частота розхитувальної сили мало відрізняється від власної частоти коливань гирі), то амплітуда коливань може стати дуже великою (у дробу $\left|\frac{A}{\omega(\omega - \beta)}\right|$ знаменник буде маленьким). Якщо $\omega = \beta$ (тобто якщо ми розхитуємо гирю в такт її власним коливанням), то формула (3) вже не застосовна. В цьому разі закон руху гирі має вигляд

$$s = \frac{A}{2\omega^2}[\sin \omega t - \omega t \cos \omega t].$$

Розмах коливань з часом збільшується, і гиря може розірвати пружину. Це явище називається резонансом.

ДОДАВАННЯ КОЛИВАНЬ

Іноді одне й те ж тіло бере участь не в одному коливальному русі, а в кількох. Підвісимо, наприклад, гирю A на пружині, а до неї також на пружині підвісимо другу гирю B (рис. 9). Якщо розтягти обидві пружини і відпустити їх, то коливання гир A і B будуть дуже складні. Наприклад, коливання гирі B викликаються, по-перше, тим, що гиря A то піднімається, то опускається, а, по-друге, тим, що пружина AB то розтягується, то скорочується. Ми говоримо в цьому випадку, що коливання гирі B є сумою двох коливань — руху гирі A і коливання гирі B відносно гирі A.

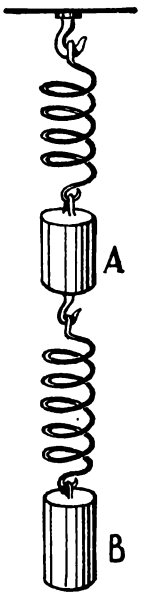


Рис. 9.

Можна навести й інші приклади додавання коливань. Коли грає оркестр, то кожен музичний інструмент викликає свої коливання повітря. Ці коливання додаються одне до одного і доносяться до нас у вигляді єдиного акорду.

Найчастіше додаються гармонічні коливання. Якщо ці коливання мають одну й ту саму частоту, то і сума їх буде гармонічним коливанням тієї ж частоти. Нехай, наприклад, додаються гармонічні коливання

$$s_1 = A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) \quad \text{і} \quad s_2 = A_2 \sin(\omega t + \alpha_2).$$

Їх сумою буде коливання

$$s = A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + A_2 \sin(\omega t + \alpha_2).$$

Цю суму можна подати у вигляді одного коливання

$$s = A \sin(\omega t + \alpha),$$

амплітуда A якого дорівнює

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)},$$

а початкова фаза α визначається рівністю

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{A_1 \sin \alpha_1 + A_2 \sin \alpha_2}{A_1 \cos \alpha_1 + A_2 \cos \alpha_2}.$$

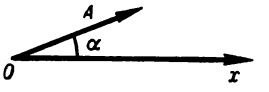


Рис. 10.

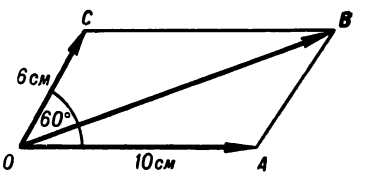


Рис. 11.

Замість таких складних формул для додавання коливань можна користуватися простим геометричним правилом. Тут нам приходять на допомогу вектори[1]. Виявляється, що не тільки силу, швидкість і прискорення, а й гармонічні коливання можна зображати векторами. Гармонічне коливання з амплітудою A і початковою фазою α зображається вектором довжини A, нахиленим до осі Ox під кутом α (рис. 10).

При додаванні коливань вектори, що зображають їх, додаються за правилом паралелограма. На рис. 11 показано додавання коливань $s_1 = 10 \sin \omega t$ і $s_2 = 6 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right)$. Вимірюючи діагональ OB паралелограма $OABC$, ми знаходимо, що амплітуда суми цих коливань дорівнює приблизно 14. Початкова ж фаза цього коливання дорівнює кутові AOB, тобто приблизно 22°, або 0,37 радіана. Тому

$$s = 10 \sin \omega t + 6 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \approx$$
$$\approx 14 \sin (\omega t + 0{,}37).$$

Особливо просто додавати коливання з однаковою початковою фазою — в цьому випадку обидва вектори напрямлені в один і той же бік, і в сумі вийде просто коливання з тією ж фазою, амплітуда якого дорівнює сумі амплітуд доданків. А якщо кути α_1 і α_2 відрізняються один від одного на π радіанів (тобто на 180°), то в результаті додавання коливань утвориться коливання, амплітуда якого дорівнює різниці амплітуд доданків. Може статися навіть, що коливання погасять одне одного (одне буде тягти в один бік, а друге — в другий, зовсім як Лебідь, Рак і Щука з байки Крилова). Таке явище називається у фізиці інтерференцією коливань. Через інтерференцію може статися так, що точка, освітлена двома джерелами світла, буде неосвітлена — два світла дадуть у сумі темряву.

БИТТЯ

Досить складна картина виникає, коли додаються коливання різної частоти. Додамо, наприклад, коливання $s_1 = A \sin \omega_1 t$ і $s_2 = A \sin \omega_2 t$, що мають однакову амплітуду, але різну частоту. В результаті утвориться коливання

$$s = A (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t). \qquad (4)$$

Це коливання можна записати також у вигляді:

$$s = 2A \sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t.$$

Множники $\sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t$ і $\cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t$ поводять себе зовсім по-різному. Якщо частоти ω_1 і ω_2 близькі одна до одної, то множник $\cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t$ буде повільно змінюватися (частота його зміни дорівнює $\frac{|\omega_1 - \omega_2|}{2}$). Коливання ж $\sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t$ має велику частоту $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$. Тому коливання (4) має ніби вигляд синусоїдального коливання з амплітудою, що повільно змінюється. Такі коливання називаються биттями. Наприклад, якщо грають два музичних інструменти на близьких нотах, що мають частоти ω_1 і ω_2, то, крім цих двох нот, ми почуємо ще ноту з частотою $\frac{|\omega_1 - \omega_2|}{2}$. Композиторам доводиться враховувати це явище. Але не тільки композиторам, а й технікам доводиться мати справу з биттями. Наприклад, при проектуванні двогвинтових кораблів доводиться враховувати, що, крім коливань з частотами ω_1 і ω_2, спричинюваними роботою гвинтів, виникає ще коливання з частотою $\frac{|\omega_1 - \omega_2|}{2}$. Якщо частота цього коливання збігається з частотою власних коливань якої-небудь деталі корабля, можуть виникнути вимушені коливання з великою амплітудою. Биття можна спостерігати і при горінні лампочки розжарювання, якщо дві динамомашини змінного струму сполучені разом.

ПРИПЛИВИ І ВІДЛИВИ

Дуже цікавий приклад биттів дають океанські припливи і відливи. Через притягання Місяця і Сонця рівень води в океані весь час змінюється. Приблизно кожні 12 годин вода досягає найвищого рівня, а через 6 годин після цього — найнижчого. Однак період коливань рівня води, спричинюваних притяганням Сонця, не збігається точно з періодом коливань рівня води, спричинюваних притяганням Місяця.

[1] Докладніше про вектори див. у статті «Геометрична алгебра».

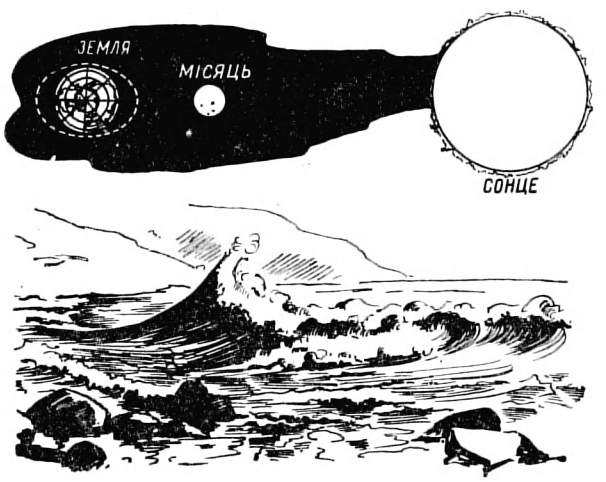


Рис. 12а.

Перший період дорівнює 12 годинам, а другий — 12 годинам 25 хвилинам. В результаті додавання цих коливань, що мають близькі періоди (а значить, і близькі частоти), виникають биття. Найбільшу висоту припливів матимемо тоді, коли Сонце, Земля і Місяць будуть розташовані так, як на рис. 12*а*; найменшу — якщо вони будуть розташовані так, як показано на рис. 12*б*. Найбільша висота припливів перевищує найменшу приблизно в два з третиною рази.

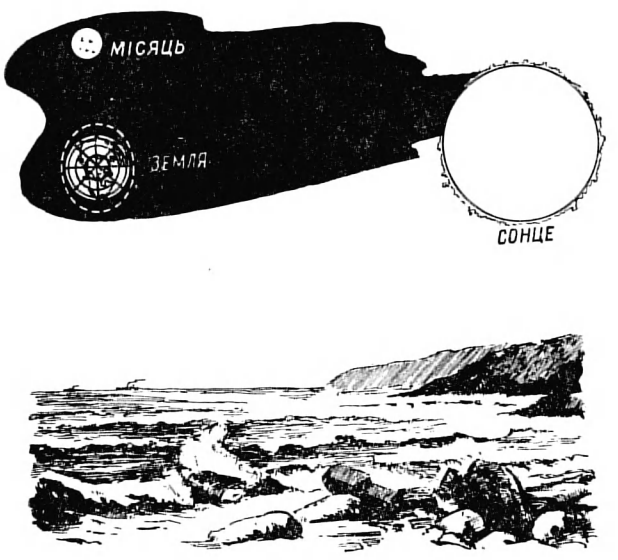


Рис. 12б.

МОДУЛЮВАННЯ КОЛИВАНЬ

Коливання з амплітудою, що періодично змінюється, застосовуються в радіотехніці. Радіостанції надсилають у простір електромагнітні коливання з дуже великою частотою (від 150 тис. до 15 млн. коливань за секунду). Амплітуда ж цих коливань змінюється приблизно з частотою звукових коливань (кілька сотень або тисяч коливань за секунду). Зміна амплітуди коливань називається амплітудним модулюванням цих коливань[1].

РОЗКЛАДАННЯ СИЛИ, ЩО ПЕРІОДИЧНО ЗМІНЮЄТЬСЯ, НА ГАРМОНІЧНІ СКЛАДОВІ

Як ми дізналися, з гармонічних коливань утворюються складніші коливання. При цьому можуть виникати коливання дуже складного виду. Але часто доводиться розв'язувати обернену задачу — розкладати складні коливання на прості, синусоїдальні. Нехай, наприклад, на гирю діє розхитувальна сила, що періодично змінює свій напрям. При цьому протягом деякого часу T гирю штовхають із сталою силою F_0 в один бік, а потім протягом такого ж проміжку часу її штовхають з тією ж силою у зворотний бік. Якщо ми будемо повторювати ці дії, то графік зміни сили набере такого вигляду, як це показано на рис. 13.

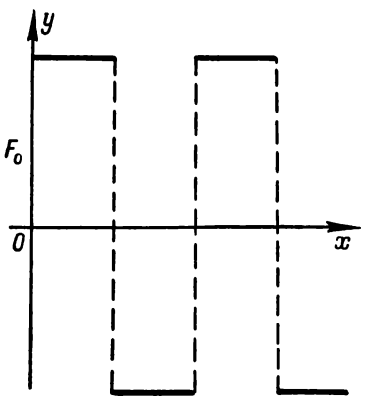


Рис. 13.

Виникає питання: як розрахувати дію цієї сили на гирю? Виявляється, що першу-ліпшу силу, яка періодично змінюється, можна з

[1] Докладніше про модулювання електромагнітних коливань див. у статті «Фізичні основи радіо».

будь-яким ступенем точності подати як суму кількох сил, що змінюються за синусоїдальним законом. Наприклад, силу F_0, зображену на рис. 13, можна наближено подати як суму трьох сил, що змінюються за такими законами:

$$F_1 = \frac{4F_0}{\pi}\sin\frac{\pi t}{T}; \quad F_2 = \frac{4F_0}{3\pi}\sin\frac{3\pi t}{T};$$
$$F_3 = \frac{4F_0}{5\pi}\sin\frac{5\pi t}{T}.$$

Якщо додати ці сили, то дістанемо графік, який дуже нагадує графік на рис. 13. Якщо ми захочемо ще точніше зобразити силу, подану на графіку, то треба до сили $F_1 + F_2 + F_3$ додати силу $F_4 + F_5 + \ldots + F_n$, де

$$F_n = \frac{4F_0}{(2n-1)\pi}\sin\frac{(2n-1)\pi t}{T}.$$

Коли розхитувальна сила зображена у вигляді суми синусоїдальних сил, підраховують дію кожної синусоїдальної сили так, як про це сказано вище, і додають всі знайдені результати. Ця сума і покаже дію даної розхитувальної сили.

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Розкладання періодичних процесів на суму синусоїдальних процесів застосовується не тільки при вивченні механічних коливань, а й у багатьох інших галузях фізики, техніки і навіть мистецтва. Найпростіший приклад такого розкладання дає спектроскоп. Якщо спрямувати на нього промінь білого світла, то утворюється райдужна смужка — спектр. Кожний колір спектра відповідає синусоїдальним електромагнітним коливанням, що мають певну частоту. Таким чином, спектроскоп розкладає складне електромагнітне коливання — білий колір — на синусоїдальні коливання. Вимірюючи енергію в різних частинах спектра, можна дізнатися, які синусоїдальні коливання, що входять до розкладуваного світла, мають більшу амплітуду, а які — меншу.

Часто всяке розкладання періодичного коливання на синусоїдальні називають спектральним аналізом або спектральним розкладанням. Спектральний аналіз застосовується також до звуків та інших коливань. З допомогою спектрального аналізу вдається встановити особливості тембру співака і т. д.

У техніці користуються спектральним аналізом коливань для того, щоб правильно розраховувати різні конструкції. Наприклад, може статися, що частота однієї з синусоїдальних складових коливань літака, викликаних роботою моторів, збігається з власною частотою коливань якої-небудь деталі літака. Тоді через резонанс при роботі моторів виникнуть сильні коливання цієї деталі, що може призвести до аварії.

ЯК МАШИНА ВІДКРИЛА ТЕОРЕМУ

Для розкладання періодичних коливань на синусоїдальні складові застосовуються різні машини. Є машини, які розв'язують і обернену задачу — за синусоїдальними складовими відтворюють все коливання. Одного разу для перевірки роботи такої машини їй дали розкласти на синусоїдальні складові коливання, зображене на рис. 13, а потім додати ці складові. Машина після підсумовування накреслила графік не такий, як на рис. 13, а такий, як на рис. 14, тобто з додатковими хвостиками на вертикальних відрізках. Спочатку появу цих хвостиків приписували недосконалості машини і думали, як її виправити. Але потім один математик (Гіббс) довів, що ці хвостики повинні з'являтися завжди, коли у коливання є розриви. Теорему назвали його ім'ям, хоч «відкрила» її машина.

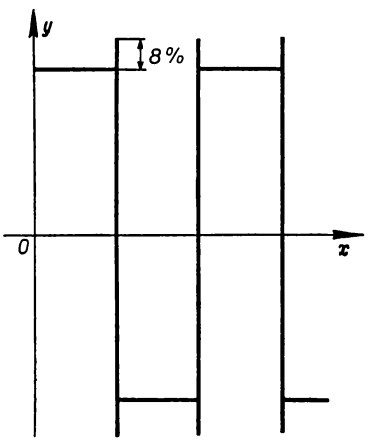


Рис. 14

ЧОМУ НЕ ПРАЦЮВАВ ТРАНСАТЛАНТИЧНИЙ КАБЕЛЬ

Коли проклали телеграфний кабель через Атлантичний океан, то виявилося, що по ньому не можна передавати телеграм. Замість крапок і тире на другому кінці кабеля виникали

На одному кінці кабеля передавали сигнали.

На другому кінці кабеля діставали сигнали, які не можна було зрозуміти.

зовсім не зрозумілі сигнали. Дослідженням роботи кабеля зайнявся відомий англійський фізик і математик Кельвін. Для цього він спочатку розклав сигнали на синусоїдальні складові і вивчив, як передаються по кабелю ці складові. Виявилося, що коливання різної частоти передаються по-різному. Одні з них йдуть швидше, інші — повільніше, одні сильно слабшають, а інші — менше. Тому, коли ці складові приходять на другий кінець кабеля, то їх сума стає зовсім не схожою на передавані сигнали. Кельвін знайшов, від чого залежить зміна швидкості і сили синусоїдальних коливань, і вказав, як зробити кабель, щоб коливання будь-якої частоти йшли по ньому з однаковою швидкістю і однаково слабшали. Коли за його вказівками переробили кабель, сигнали почали передаватися без спотворень і трансатлантичний зв'язок налагодився.

РАДІОПРИЙМАЧ І КАМЕРТОН

Іноді замість розкладу коливання на синусоїдальні складові намагаються виділити з усього коливання одну складову певної частоти. Саме це роблять, коли настроюють радіоприймач на певну частоту; з складного електромагнітного коливання, викликаного роботою всіх радіостанцій, ловлять коливання, викликане роботою потрібної станції. Так само камертон відзивається тільки на ту ноту, на яку його настроєно.

ВИСНОВОК

Справді безмежна галузь застосувань показникової і тригонометричної функцій у природі і техніці! Очевидно, можна було б заповнити весь цей том Дитячої енциклопедії, розповідаючи про такі приклади. Виникають природні запитання: що є спільного між тертям каната об стовп, радіоактивним розпадом, канатом рівного опору на розрив і т. д.? Чому електромагнітні коливання такі подібні до механічних коливань? Чому так часто зустрічаються в різних питаннях науки і техніки саме ці функції?

Зараз ми не можемо відповісти на ці запитання. Але в кінці наступної статті, присвяченої одному з розділів вищої математики, ми поговоримо і про це.

ІНТЕГРАЛ І ПОХІДНА

ЗАДАЧА КЕПЛЕРА

Коли б бочки вміли говорити, то, безперечно, багато які з них із задоволенням розповіли б повчальну історію про великі заслуги бочок у створенні... вищої математики! Історія ця така.

У листопаді 1613 р. королівський математик і астролог австрійського двора Йоганн Кеплер справляв весілля. Готуючись до нього, він придбав кілька бочок виноградного вина. Купуючи вино, Кеплер був уражений тим, що продавець визначав місткість бочки, виконуючи одну єдину дію, — вимірював відстань від наливного отвору до найбільш віддаленої від нього точки днища (рис. 1). Адже при такому вимірюванні зовсім не враховувалась форма бочки! Кеплер відразу побачив, що перед ним надзвичайно цікава математична задача — за кількома вимірюваннями обчислити місткість бочки. Міркуючи над цією задачею, він знайшов формули не тільки для об'єму бочок, а й для об'єму найрізноманітніших тіл: «лимона», «яблука», «айви» і навіть «турецької чалми» (рис. 2). Для кожного з тіл Кеплеру доводилося створювати нові, часто дуже хитромудрі методи.

У наші дні обчислювати об'єми різних тіл (значно складніших, ніж у Кеплера) потрібно при розв'язуванні багатьох технічних задач: при знаходженні об'єму корпусу корабля, об'єму газгольдера складної форми, об'єму водосховища та ін. І розв'язувати такі задачі доводиться майже кожному інженерові, кожному технікові. Прості і загальні методи розв'язування таких задач даються вищою математикою.

Рис. 1.

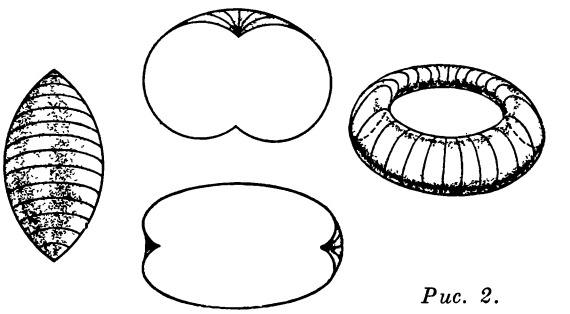


Рис. 2.

МАТЕМАТИКА ЗА ЧАЙНИМ СТОЛОМ

Щоб мати уявлення про ці загальні методи, спробуємо знайти (хоч би приблизно) об'єм поданого до столу лимона. Ні до одного з тіл, що вивчаються в школі (куля, циліндр, конус і т. д.), лимон не подібний. Проте господиня тут же приходить нам на допомогу: вона розрізує лимон на тонкі скибочки. Рівно обрізавши край кожної скибочки, можна перетворити її в низенький циліндр (рис. 3), об'єм якого легко обчислити. Прикладаючи один до одного ці циліндри, ми дістанемо «ступінчасте тіло» (рис. 4). Його об'єм дорівнює сумі об'ємів циліндрів. Якщо скибочки дуже тонкі, то об'єм ступінчастого тіла мало відрізняється від об'єму лимона, і чим тонші будуть скибочки, тим ця відмінність буде менша.

ОБ'ЄМ ТІЛА

Прийом, застосований нами для обчислення об'єму лимона, придатний для обчислення об'єму будь-якого тіла обертання. Нехай фігура *ABCD* (рис. 5) обертається навколо сторони *AB*. Розріжемо утворюване тіло обертання (рис. 6) на тонкі скибочки і кожну скибочку замінимо циліндром. Тоді ми легко можемо знайти об'єм утворюваного ступінчастого тіла (рис. 7). Для цього нам треба знати, як змінюється площа перерізу з висотою (рис. 8). Нехай площа

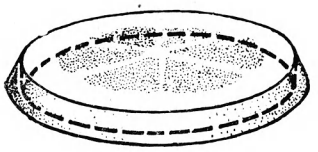


Рис. 3

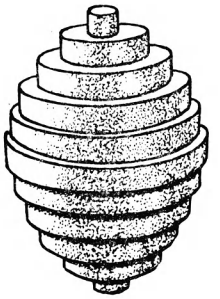


Рис. 4.

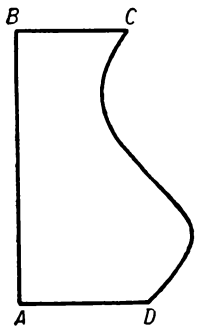


Рис 5.

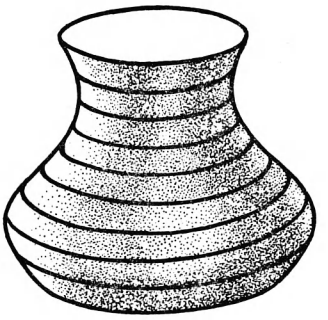


Рис. 6

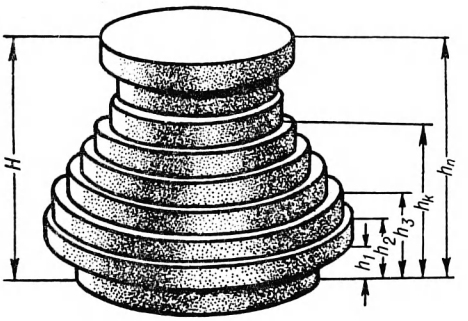


Рис. 7

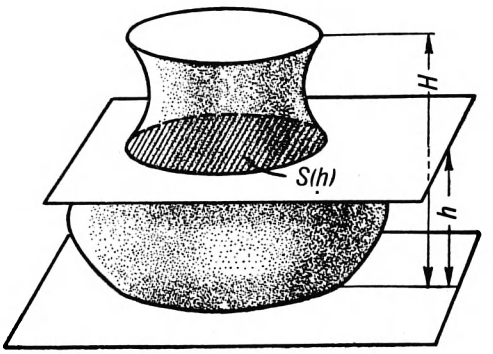


Рис. 8.

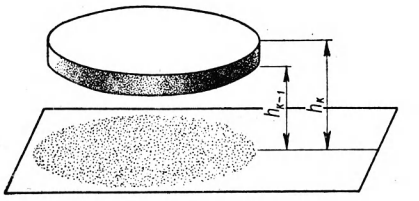


Рис. 9.

перерізу, проведеного на висоті h, дорівнює $S(h)$. Припустимо, крім того, що тіло розрізано на n скибочок перерізами, проведеними на висотах h_0, h_1, ..., h_n над площиною нижньої основи (площина нижньої основи збігається з перерізом на висоті h_0, а площина верхньої — з перерізом на висоті h_n, тобто $h_0 = 0$, $h_n = H$) (рис. 7). Площа перерізу на висоті h_k дорівнює $S(h_k)$. Тому об'єм циліндра, яким ми заміняємо k-ту скибочку (рис. 9), дорівнюватиме $S(h_k)(h_k - h_{k-1})$ (бо його висота дорівнює $h_k - h_{k-1}$). Додаючи об'єми цих циліндриків, ми дістанемо об'єм всього ступінчастого тіла:

$$V_{\text{ступ. тіла}} = S(h_1)(h_1 - h_0) + S(h_2)(h_2 - h_1) + \\ + \ldots + S(h_n)(h_n - h_{n-1}).$$

Чим тонші будуть скибочки, тим ближчий буде об'єм ступінчастого тіла до об'єму тіла обертання.

Таким же способом можна знайти об'єм будь-якого тіла, якщо відомо, як змінюється площа тіла з висотою перерізу. Наприклад, для того щоб обчислити об'єм проектованого корабля, досить мати рисунки (виконані в певному масштабі) поперечних розрізів корабля. За цими рисунками треба знайти площу кожного розрізу (як обчислювати площі складних фігур, ми розповімо на наступній сторінці), після чого вказана вище формула дасть приблизне значення об'єму корабля. Звісно, таким же прийомом можна знаходити об'єми газгольдерів, водосховищ та інших тіл.

ПРОМІРЮВАННЯ РІКИ

При проектуванні гідроелектростанцій треба знати витрату води в ріці, тобто кількість води, що протікає в даному місці за 1 сек. Ясно, що витрата води в ріці дорівнює добутковій площі поперечного перерізу ріки на швидкість течії. Швидкість течії визначити досить просто, а ось площу поперечного перерізу знайти набагато складніше. Однак і тут на

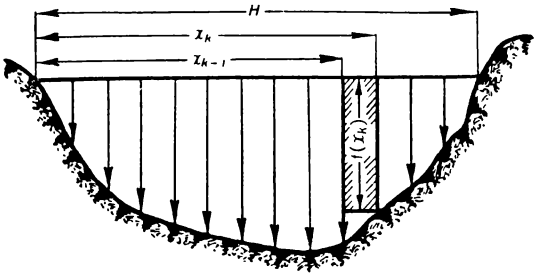


Рис. 10

допомогу нам приходить розрізування на «скибочки». Кожну «скибочку» можна наближено замінити прямокутником. Додаючи потім площі цих прямокутників, ми і знайдемо наближене значення площі перерізу. Чим тонші будуть «скибочки», тим точніше значення площі ми дістанемо. Вимірюємо глибину ріки в точках, що перебувають на відстані x_0, x_1, ..., x_n від берега ($x_0 = 0$; $x_n = H$ — ширина ріки). Нехай на відстані x_k від берега глибина дорівнює $f(x_k)$ (рис. 10). Тоді площа поперечного перерізу приблизно дорівнює

$$S_{\text{поп. пер.}} \approx f(x_1)(x_1 - x_0) + f(x_2)(x_2 - x_1) + \\ + \ldots + f(x_n)(x_n - x_{n-1}).$$

Взагалі, якщо геометрична фігура має вигляд, зображений на рис. 11 (така фігура називається криволінійною трапецією), і якщо висота в точці з абсцисою x дорівнює $f(x)$, то для обчислення площі фігури ми можемо користуватися тією ж формулою. Чим «густіше» розміщені точки x_0, x_1,...,x_n на відрізку AB, тим точніше значення для площі фігури ми дістаємо за цією формулою.

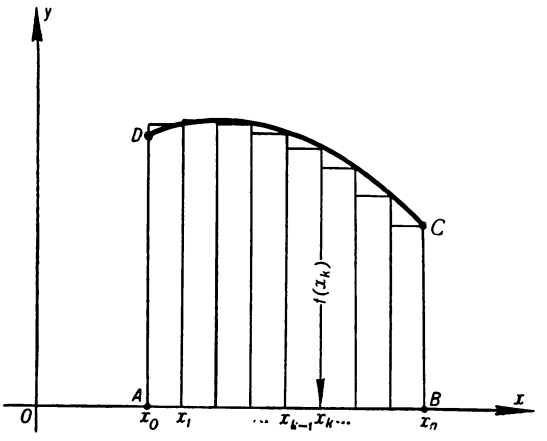
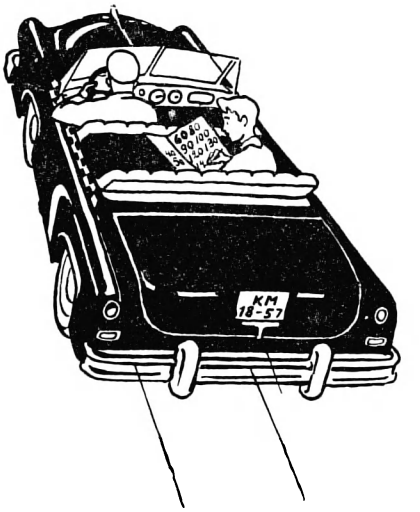


Рис. 11.

В АВТОМОБІЛІ

Для вимірювання шляху, пройденого автомобілем, на ньому встановлюють спеціальний лічильник. Але навіть якщо цей лічильник зіпсований, можна підрахувати пройдений автомобілем шлях за спідометром (приладом, що показує швидкість автомобіля).



Для цього треба записати покази спідометра в моменти часу $t_0 = 0$, $t_1, t_2, \ldots, t_n = T$. Коли б автомобіль від моменту t_{k-1} до моменту t_k рухався рівномірно з тією швидкістю $v(t_k)$, яку він у дійсності мав наприкінці цього проміжку, тобто в момент t_k, то за проміжок часу від t_{k-1} до t_k він проїхав би відстань $v(t_k)(t_k - t_{k-1})$. Тому шлях, пройдений за весь час руху від 0 до T, дорівнював би

$$v(t_1)(t_1 - t_0) + v(t_2)(t_2 - t_1) + \\ + \ldots + v(t_n)(t_n - t_{n-1}).$$

Цією формулою можна користуватися для наближеного підрахунку шляху, пройденого автомобілем. Вона, звичайно, лише наближена. Автомобіль не завжди рухається рівномірно, і навіть за маленький проміжок часу швидкість його встигає кілька разів змінитися. Однак чим частіше ми будемо записувати покази спідометра, тобто чим менші будуть проміжки часу між окремими вимірюваннями, тим точніше написана формула даватиме справжнє значення шляху, пройденого автомобілем.

РОБОТА ПАРОВОЗА

Тепер подивимося на поїзд, який рухається. Коли поїзд рухається, паровоз здійснює деяку роботу. Коли б весь шлях був цілком

однаковий, то цю роботу було б легко підрахувати, помноживши силу тяги паровоза на довжину шляху. Але в деяких місцях колія йде вгору, в інших — під уклон, в одних місцях колія в доброму стані, в інших — у гіршому, і тому в одній точці шляху паровоз розвиває одну силу тяги, а в другій — другу. Інакше кажучи, сила тяги є функцією $F(l)$ від відстані l, пройденої паровозом з моменту рушання. Щоб знайти роботу паровоза, треба розбити весь шлях на маленькі ділянки точками, які перебувають від початкової точки шляху на відстанях $l_0 = 0, l_1, \ldots, l_n = L$ (де L — довжина всього пройденого шляху). Можна вважати, що на кожній ділянці від точки l_{k-1} до точки l_k сила тяги приблизно стала і дорівнює $F(l_k)$. Отже, робота на цій ділянці приблизно дорівнює $F(l_k)(l_k - l_{k-1})$, а для всієї роботи дістаємо наближене значення

$$A \approx F(l_1)(l_1 - l_0) + F(l_2)(l_2 - l_1) + \ldots + F(l_n)(l_n - l_{n-1}).$$

Чим густіше ми братимемо точки $l_0, l_1, \ldots, l_n$, тим точніше дістанемо значення роботи паровоза. Аналогічно обчислюється робота змінної сили і в інших випадках.

ІНТЕГРАЛ

Ми розібрали багато задач з різних галузей фізики, техніки, геометрії. Незважаючи на зовнішню відмінність цих задач, у них було багато спільного. Щоразу для наближеного обчислення деякої величини (роботи, об'єму, площі, шляху і т. д.) ми діставали суму виду

$$f(x_1)(x_1 - x_0) + f(x_2)(x_2 - x_1) + \ldots + f(x_n)(x_n - x_{n-1}).$$

Тут $f(x)$ — деяка функція, задана на відрізку від a до b, а $x_0 = a, x_1, \ldots, x_{n-1}, x_n = b$ — точки на цьому відрізку. Наприклад, при обчисленні шляху функція $f(x)$ була швидкістю в момент часу x (тільки час ми раніше позначали буквою t, а не x, що, звичайно, неістотно), a дорівнювало нулеві, а b — часу T руху автомобіля; при обчисленні роботи функція $f(x)$ була силою тяги, а числа a і b позначали початкову і кінцеву точки шляху і т. д.

Суми такого виду зустрічаються в математиці та її застосуваннях дуже часто. Їх називають інтегральними сумами. Такі суми дають значення шуканої величини тільки наближено. Але якщо ми будемо брати точки $x_0, x_1, \ldots, x_n$ все густіше і густіше на відрізку від a до b, то інтегральні суми наближатимуться до деякого числа, а саме — до точного значення шуканої величини. Це число називається інтегралом від функції $f(x)$ на відрізку від a до b і позначається через $\int_a^b f(x)\,dx$. Таким чином,

$$\int_a^b f(x)\,dx = \lim [f(x_1)(x_1 - x_0) + \ldots + f(x_n)(x_n - x_{n-1})],$$

де границя lim береться при умові, що число проміжків необмежено збільшується, а їх довжини прямують до нуля.

У самому позначенні $\int_a^b f(x)\,dx$ зберігаються згадки про інтегральну суму, з якої виходить інтеграл. В Італії букву s часто пишуть у вигляді $\int$. Тому самий знак інтеграла є просто перша буква латинського слова summa (сума). Слідом за знаком $\int$ вказується, що підсумовувалися вирази виду $f(x_k)(x_k - x_{k-1})$. Тільки замість різниці $x_k - x_{k-1}$ пишуть dx, де d — перша буква латинського слова differentia (різниця). Поняття інтеграла є одним з основних у вищій математиці. Користуючись цим поняттям, можна записати чимало знайдених раніше формул набагато коротше і не наближено, а точно. Наприклад, формула об'єму будь-якого тіла набирає вигляду

$$V = \int_0^H S(h)\,dh, \qquad (1)$$

де H — висота цього тіла, а $S(h)$ — площа перерізу, проведеного паралельно основі тіла на висоті h від основи (рис. 8).

Формулу площі фігури, зображеної на рис. 11, можна записати у вигляді

$$S = \int_a^b f(x)\,dx, \qquad (2)$$

де $f(x)$ — висота кривої CD в точці з абсцисою x.

Шлях, пройдений за проміжок часу від 0 до T, виражається через швидкість $v(t)$ за формулою

$$s = \int_0^T v(t)\,dt, \qquad (3)$$

а робота визначається формулою

$$A = \int_0^L F(l)\,dl, \qquad (4)$$

де L — довжина шляху, а $F(l)$ — значення сили, що здійснює роботу на відстані l від початку шляху.

ГЕОМЕТРИЧНЕ ОБЧИСЛЕННЯ ІНТЕГРАЛІВ

Формули (1) і (2) можна використати для знаходження площ та об'ємів різних тіл. Але через те що площі і об'єми простих тіл ми вже знаємо, то, навпаки, з допомогою цих формул можна обчислити значення деяких простих інтегралів (далі, на стор. 167, ми вкажемо, як можна підрахувати ці інтеграли безпосереднім обчисленням, не вдаючись до геометрії).

Найпростішою геометричною формулою обчислення площі є формула площі прямокутника: $S = hb$. Прямокутник можна розглядати як криволінійну трапецію, висота якої в усіх точках однакова і дорівнює h (рис. 12), так що його площу можна записати у вигляді інтеграла $S = \int_0^b h\,dx$, де h — стала величина. Отже, ми довели формулу

$$\int_0^b h\,dx = hb \ (h \text{ — стала}).$$

Зокрема, при $h = 1$ дістаємо

$$\int_0^b dx = b. \qquad (5)$$

Згадаємо тепер формулу площі прямокутного трикутника $S = \frac{1}{2}hb$, де h і b—катети. З рис. 13 видно, що трикутник можна розглядати як криволінійну трапецію, висота y якої в точці з абсцисою x дорівнює $\frac{hx}{b}$ (це випливає з подібності трикутників OAB і OCD). Тому площу трикутника можна записати у вигляді інтеграла $S = \int_0^b \frac{hx}{b}\,dx$.

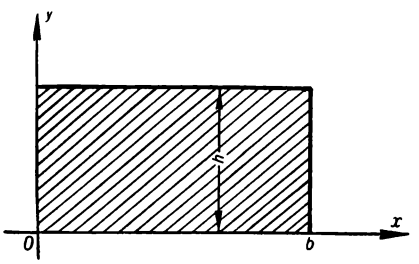
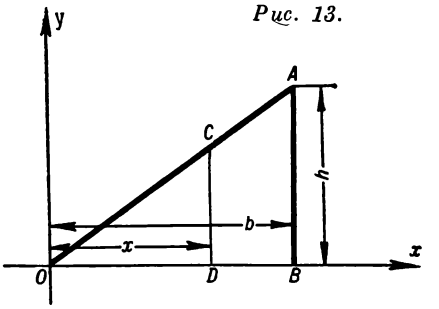


Рис. 12.

Рис. 13.



Таким чином, ми довели, що

$$\int_0^b \frac{hx}{b}\,dx = \frac{1}{2}hb.$$

Зокрема, якщо трикутник OAB рівнобедрений, тобто якщо $h = b$, то ми дістаємо формулу

$$\int_0^b x\,dx = \frac{1}{2}b^2. \qquad (6)$$

Нарешті, розглянемо ще один приклад. Візьмемо конус з висотою H і радіусом основи R. Поставимо цей конус на вершину (так, щоб його вісь була вертикальною) і проведемо площину паралельно основі конуса на відстані x від вершини. Вона перетне конус по кругу, радіус якого дорівнює $\frac{Rx}{H}$ (рис. 14). Площа $S(x)$ цього перерізу дорівнює $\pi\left(\frac{Rx}{H}\right)^2 =$

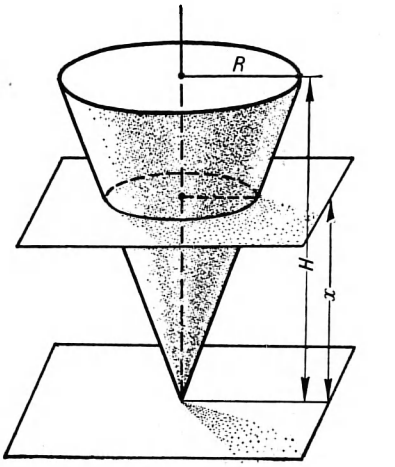


Рис. 14.

$= \frac{\pi R^2}{H^2} x^2$. Тому за формулою (1) об'єм V конуса виражається інтегралом виду

$$V = \int_0^H \frac{\pi R^2}{H^2} x^2 dx.$$

Порівнюючи цю формулу з відомою з шкільного курсу формулою об'єму конуса $V = \frac{1}{3}\pi R^2 H$, дістаємо, що

$$\int_0^H \frac{\pi R^2}{H^2} x^2 dx = \frac{1}{3}\pi R^2 H.$$

Ця формула вірна при будь-яких додатних значеннях R і H. Зокрема, при $R = \frac{1}{\sqrt{\pi}} b$, $H = b$ (і, отже, $\frac{\pi R^2}{H^2} = 1$, $\pi R^2 H = b^3$) дістаємо:

$$\int_0^b x^2 dx = \frac{1}{3} b^3. \qquad (7)$$

Знайдені вище формули (5), (6), (7), очевидно, можна об'єднати в одну загальну формулу

$$\int_0^b x^n dx = \frac{b^{n+1}}{n+1} \qquad (8)$$

при $n = 0, 1, 2$. Ця формула, як це доводиться у вищій математиці, справедлива не тільки при $n = 0, 1, 2$, а й при будь-яких додатних значеннях показника n. Наприклад,

$$\int_0^b x^{10} dx = \frac{b^{11}}{11}; \quad \int_0^b \sqrt{x}\, dx = \int_0^b x^{\frac{1}{2}} dx = \frac{2}{3} b^{\frac{3}{2}}.$$

ІНТЕГРУВАННЯ МНОГОЧЛЕНІВ

Тепер вже неважко навчитися інтегрувати будь-який многочлен. Зробимо попереду два простих, але дуже важливих зауваження.

Нехай два тіла M_1 і M_2 рухаються в одному й тому ж напрямі, причому так, що швидкість тіла M_2 в кожний момент часу в k раз більша від швидкості тіла M_1. Тоді зрозуміло, що і шлях, пройдений тілом M_2, буде в k раз більший від шляху, пройденого за той же час тілом M_1. Запишемо цей очевидний факт формулою. Позначимо швидкість тіла M_1 в момент t через $v(t)$, тоді швидкість тіла M_2 в той же момент дорівнює $k\ v(t)$. Шляхи s_1 і s_2, пройдені тілами M_1 і M_2 за проміжок часу від $t = 0$ до $t = T$, дорівнюють:

$$s_1 = \int_0^T v(t)\, dt, \quad s_2 = \int_0^T kv(t)\, dt.$$

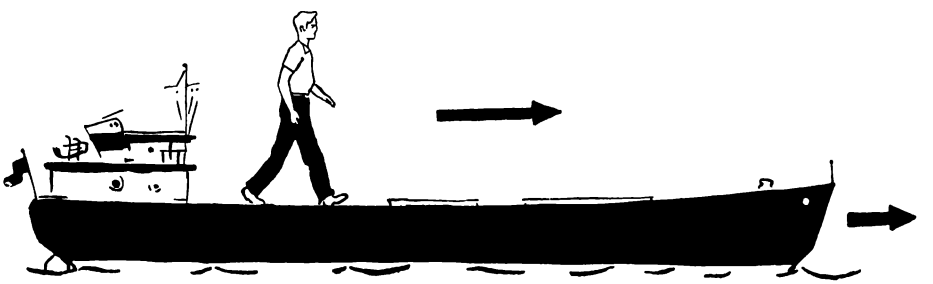
Але через те що шлях, пройдений другим тілом, в k раз більший від шляху, пройденого першим тілом (тобто $s_2 = ks_1$), то

$$\int_0^T k \cdot v(t)\, dt = k \cdot \int_0^T v(t)\, dt.$$

Інакше кажучи, числовий (сталий) множник можна виносити з-під знака інтеграла.

Друге зауваження. Нехай тіло M_1 рухається в деякому напрямі, а по його поверхні рухається в тому ж напрямі тіло M_2. Наприклад, баржа пливе по ріці, а по її палубі йде людина. Позначимо швидкість руху тіла M_1 через $v_1(t)$, а швидкість переміщення тіла M_2 по поверхні тіла M_1 — через $v_2(t)$. Тоді шлях, пройдений тілом M_1 за час від $t = 0$ до $t = T$, дорівнює

$$\int_0^T v_1(t)\, dt,$$



а шлях, пройдений тілом M_2 по поверхні тіла M_1, дорівнює

$$\int_0^T v_2(t)\,dt.$$

А загальний шлях, пройдений у просторі тілом M_2 (як за рахунок власного руху, так і за рахунок руху тіла M_1, яке його «везе»), дорівнює

$$\int_0^T v_1(t)\,dt + \int_0^T v_2(t)\,dt.$$

Але зрозуміло, що швидкість переміщення тіла M_2 в просторі дорівнює $v_1(t) + v_2(t)$, так що шлях, пройдений цим тілом, має значення

$$\int_0^T [v_1(t) + v_2(t)]\,dt.$$

Прирівнюючи обидва знайдені значення шляху, дістанемо

$$\int_0^T [v_1(t) + v_2(t)]\,dt = \int_0^T v_1(t)\,dt + \int_0^T v_2(t)\,dt,$$

тобто інтеграл від суми двох (або кількох) функцій дорівнює сумі інтегралів від доданків.

Переходимо до інтегрування многочленів. Нехай, наприклад, треба обчислити інтеграл

$$\int_0^b (x^2 - 3x + 5)\,dx.$$

Через те що підінтегральний вираз є сума $x^2 + (-3x) + 5$, то наш інтеграл можна розбити на три:

$$\int_0^b x^2 dx + \int_0^b (-3x)\,dx + \int_0^b 5dx.$$

У другому і третьому інтегралах можна винести за знак інтеграла числовий множник, після чого ми легко дістанемо відповідь:

$$\int_0^b (x^2 - 3x + 5)\,dx = \int_0^b x^2 dx - 3\int_0^b x dx + 5\int_0^b dx = \frac{b^3}{3} - 3\frac{b^2}{2} + 5b.$$

Інакше кажучи, інтегрувати многочлени можна почленно.

Взагалі, якщо

$$f(x) = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \ldots + a_{n-1}x + a_n -$$

деякий многочлен n-го степеня, то його інтеграл знаходимо за формулою

$$\int_0^b f(x)\,dx = a_0\frac{b^{n+1}}{n+1} + a_1\frac{b^n}{n} + \ldots + a_{n-1}\frac{b^2}{2} + a_n b.$$

ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕГРАЛІВ

Ми навчилися обчислювати інтеграли від многочленів. Цього вже досить, щоб мати змогу розв'язувати багато математичних і фізичних задач. Покажемо для початку, як просто одержувати з допомогою інтегралів деякі формули, що вивчаються в школі.

Виведемо формулу шляху рівноприскореного руху. Якщо початкова швидкість тіла в момент $t = 0$ дорівнює v_0, а прискорення руху дорівнює a, то у момент часу t швидкість тіла становитиме $v(t) = v_0 + at$. Тому за формулою (3) шлях, пройдений тілом з початку руху до моменту T, виражається формулою

$$s = \int_0^T v(t)\,dt = \int_0^T (v_0 + at)\,dt = v_0 T + \frac{aT^2}{2}.$$

Дуже просто з допомогою інтегралів підрахувати і роботу, яка витрачається для розтягнення пружини. За законом Гука сила натягу $F(x)$ пружини, що здовжилась на величину x, дорівнює kx, де k — стале число, яке називається жорсткістю пружини. Тому робота, необхідна для того, щоб здовжити пружину на b сантиметрів, дорівнює

$$A = \int_0^b kx dx = k\frac{b^2}{2}.$$

Затрачена робота дорівнює потенціальній енергії розтягнутої пружини. Тому знайдену формулу можна розглядати і як формулу для потенціальної енергії розтягнутої пружини.

Виведемо тепер деякі геометричні формули. Спочатку знайдемо, чому дорівнює об'єм кулі радіуса R. Звичайно, нам досить знайти об'єм півкулі, а потім його подвоїти. Розріжемо півкулю площиною, паралельною її основі і розташованою на відстані x від основи (рис. 15). У перерізі матимемо круг радіуса $AB = \sqrt{R^2 - x^2}$ (це виходить, якщо застосувати теорему Піфагора до трикутника OAB). Тому площа утвореного перерізу дорівнює

$$\pi(\sqrt{R^2 - x^2})^2 = \pi R^2 - \pi x^2.$$

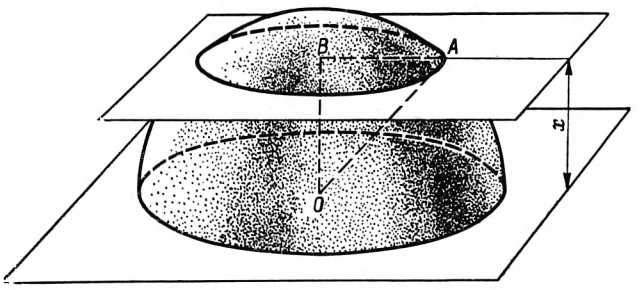


Рис. 15

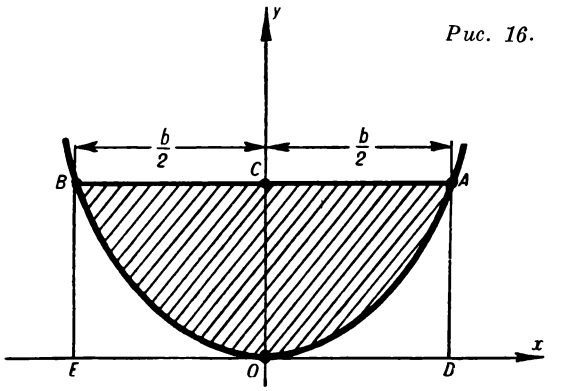


Рис. 16.

Але тоді об'єм півкулі (висота її дорівнює R) виражається формулою

$$V_{\text{півкулі}} = \int_0^R (\pi R^2 - \pi x^2)\,dx = \pi R^2 R - \pi \frac{R^3}{3} = \frac{2}{3}\pi R^3.$$

Отже, об'єм всієї кулі дорівнює $\frac{4}{3}\pi R^3$.

Але з допомогою інтегрального числення можна знайти і такі площі та об'єми, які не вивчаються в школі. Знайдемо, наприклад, площу параболічного сегмента $AOBA$, у якого хорда AB дорівнює b, а стрілка OC дорівнює h (рис. 16). Рівняння параболи має вигляд $y = ax^2$. В точці з абсцисою $x = \frac{b}{2}$ ордината AD повинна дорівнювати довжині стрілки h. Тому $h = \frac{ab^2}{4}$. Але це значить, що $a = \frac{4h}{b^2}$. Отже, наш параболічний сегмент обмежений знизу параболою, у якої в точці з абсцисою x ордината $y = \frac{4hx^2}{b^2}$. Ми легко можемо тепер знайти площу кривого трикутника OAD. За формулою (2) вона дорівнює

$$S = \int_0^{\frac{b}{2}} \frac{4hx^2}{b^2}\,dx = \frac{4h}{3b^2}\left(\frac{b}{2}\right)^3 = \frac{hb}{6}.$$

Площа прямокутника $ABED$ дорівнює bh, і площу параболічного сегмента дістанемо, якщо від площі прямокутника віднімемо подвоєну площу трикутника OAD. Матимемо $\frac{2bh}{3}$.

Круговий сегмент, що має невеликий центральний кут, можна наближено замінити параболічним сегментом з тією ж хордою і тією ж стрілкою (рис. 17). Тому для площі кругового сегмента справедлива наближена формула

$$S_{\text{круг. сегм.}} \approx \frac{2}{3}bh.$$

Наприклад, якщо центральний кут сегмента дорівнює 60°, то наближена формула дає результат $0{,}0893...R^2$, а точна $0{,}0906...R^2$. Таким чином, навіть для такого порівняно великого центрального кута, як 60°, наведена формула дає точність до 1,5%.

ЧУДЕСНА ФОРМУЛА

Той же спосіб, який ми застосували для наближеного обчислення площі кругового сегмента, можна, звичайно, застосувати і для випадку довільної криволінійної трапеції, обмеженої зверху кривою CD з рівнянням $y = f(x)$ (рис. 18). Позначимо через M середину відрізка AB і поставимо в точках A, M і B ординати AD, MN, BC кривої CD. Довжини цих ординат позначимо через y_0, y_1, y_2. Проведемо через точки C, N і D дугу параболи (таку дугу можна провести завжди і до того ж тільки одну; іноді вона перетворюється у відрізок прямої).

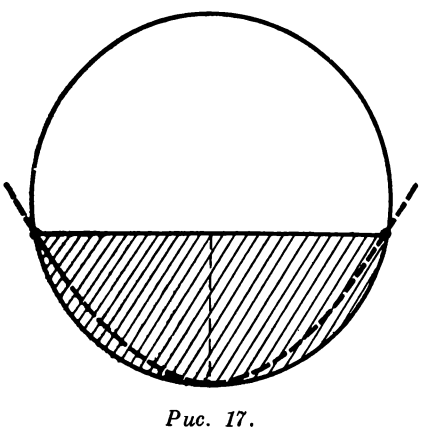


Рис. 17.

Досить прості підрахунки, що використовують формули (5), (6), (7), показують, що площа, яка лежить під цією дугою параболи, дорівнює $\frac{b-a}{6}(y_0+4y_1+y_2)$, де b і a — абсциси точок B і A. Без великої помилки можна прийняти, що цьому ж дорів-

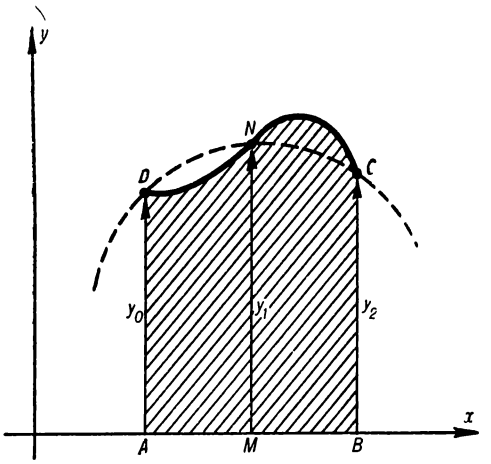


Рис. 18.

нює і площа криволінійної трапеції $ABCD$, тобто що

$$S_{ABCD} \approx \frac{b-a}{6}(y_0 + 4y_1 + y_2).$$

Оскільки площа криволінійної трапеції виражається інтегралом $\int_a^b f(x)\,dx$, то знайдена формула дає наближене значення цього інтеграла. Інакше кажучи,

$$\int_a^b f(x)\,dx \approx \frac{b-a}{6}(y_0 + 4y_1 + y_2),$$

де y_0, y_1, y_2 — значення функції $f(x)$ у точках з абсцисами a, $\frac{a+b}{2}$ і b.

Об'єм будь-якого тіла можна наближено обчислити за такою ж формулою:

$$V = \int_0^H S(x)\,dx \approx \frac{H}{6}(S_0 + 4S_1 + S_2),$$

де H — висота тіла, S_0 — площа нижнього перерізу, S_2 — площа верхнього перерізу, S_1 — площа середнього перерізу. До цієї формули вдаються для наближеного обчислення об'єму дерева, стогу, бочки та інших фігур більш чи менш складної форми. Цікаво те, що для всіх фігур, які вивчаються в школі (призми, циліндра, піраміди, конуса, зрізаної піраміди, зрізаного конуса, кулі, кульового шару, кульового сегмента), ця формула дає не наближений, а цілком точний результат. Пропонуємо нашим читачам перевірити це твердження.

ЯК ВИМІРЯТИ ШВИДКІСТЬ ПОЛЬОТУ КУЛІ

Ми часто говорили вище про швидкість руху (наприклад, автомобіля). Так, ми мали формулу

$$s = \int_0^T v(t)\,dt,$$

в якій $v(t)$ означало швидкість руху тіла в *момент часу* t. Таку швидкість у фізиці називають миттьовою швидкістю. Яким же способом можна виміряти миттьову швидкість руху? Якщо мова йде про швидкість руху автомобіля, в кабіні якого ми їдемо, то все дуже просто — треба лише глянути на стрілку спідометра, і ми знатимемо швидкість руху. Але як узнати швидкість руху автомобіля, що проїздить повз нас вулицею, або швидкість польоту кулі? Ми знаємо, що є прилади для вимірювання відстаней (лінійки, рулетки та ін.). Прикладемо такий прилад до вимірюваної відстані, і відповідь відразу видно. Є прилади і для вимірювання часу (годинники, хронометри). Багато є й інших корисних приладів, але «швидкостімірів» — приладів, які можна було б «прикласти» до тіла, що рухається повз нас, щоб безпосередньо за його показом узнати швидкість руху тіла, немає. Та і як «прикласти» прилад до автомобіля, що мчить мимо, або до кулі, що летить?!

До деякої міри нам можуть допомогти прилади, що вимірюють відстань і час. Ці прилади дозволяють виміряти шлях, який пролетіла куля, і час, який вона на це затратила.

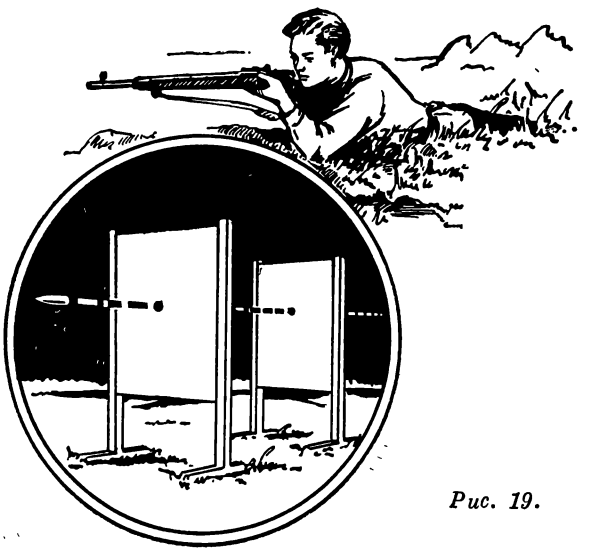


Рис. 19.

Поділивши шлях на час, ми і узнаємо швидкість польоту кулі. Однак таким способом ми дістаємо лише с е р е д н ю швидкість польоту кулі, яка мало про що говорить: адже опір повітря постійно сповільнював рух кулі, і тому наприкінці шляху вона летіла з меншою швидкістю, ніж на його початку. Тому для визначення швидкості кулі в деякій точці її шляху роблять інакше. В цій точці ставлять лист тонкого матеріалу, з'єднаний з годинником так, що він відмічає момент часу t_1, коли куля пробиває цей лист. На невеликій відстані від нього ставлять другий лист, теж з'єднаний з годинником, так що він відмічає момент t_2, коли куля його пробиває. Нехай перший лист стоїть на відстані s_1 від лінії вогню, а другий лист — на відстані s_2 (рис. 19). Тоді відстань $s_2 - s_1$ куля пролітає за час $t_2 - t_1$. Отже, середня швидкість польоту кулі за цей час дорівнює

$$v_{\text{серед.}} = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}.$$

Але й це вимірювання не дає точного значення миттьової швидкості в момент t_1. Адже повітря гальмувало кулю, коли вона летіла між листами, і до другого листа куля підлетіла з дещо меншою швидкістю, ніж до першого. Щоб зменшити вплив опору повітря на швидкість кулі, треба ставити листи ближче один до одного. І чим ближче буде другий лист до першого, тим точніше виміряємо ми миттьову швидкість польоту кулі в момент t_1 (ми вважаємо, звичайно, що у нас цілком точний годинник і бездоганні лінійки). При цьому чим ближче один до одного розміщені листи, тим за менший проміжок часу $t_2 - t_1$ пролітає куля відстань між ними. Ми можемо сказати, таким чином, що миттьова швидкість польоту кулі дорівнює

$$v(t_1) = \lim \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1},$$

де границя береться при умові, що значення s_2 наближається до значення s_1 (або, що те саме, при умові, що значення t_2 наближається до значення t_1).

ШВИДКІСТЬ РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ

Різні радіоактивні речовини розпадаються не однаково швидко.

У якому ж розумінні можна говорити про те, що розпад відбувається «швидко» або «повільно»? Як можна виміряти «швидкість розпаду» куска радіоактивної речовини у даний момент часу? Легко виміряти середню швидкість розпаду за 1 рік: треба виміряти кількість речовини, що розпалася за 1 рік, у грамах і поділити її на число секунд в році. Це і дасть середню швидкість розпаду, виражену в *г/сек*. Однак для знаходження миттьової швидкості розпаду цей розрахунок мало придатний — адже протягом року кількість радіоактивної речовини поступово зменшувалась, тому вона розпадалась чимраз повільніше. Щоб точніше визначити швидкість розпаду в даний момент часу, треба виміряти середню швидкість розпаду не за рік, а за місяць або ще краще за добу, годину, хвилину і т. д. Щоразу треба брати кількість речовини, яка розпалася за цей час, і ділити на число секунд у вибраному проміжку часу. Так, зменшуючи весь час проміжки часу між двома вимірюваннями маси речовини, ми наближатимемося до якогось числа. Це число і дасть нам швидкість розпаду в даний момент часу.

Формулами це можна записати так. Припустимо, що в пробірці в момент часу t_1 маса радіоактивної речовини, яка ще не розпалася, дорівнювала m_1, а через деякий час, у момент t_2, маса її зменшилась (бо частина речовини перетворилась у продукт розпаду) і стала дорівнювати m_2. Таким чином, за час $t_2 - t_1$ маса радіоактивної речовини, яка була в пробірці, змінилась на $m_2 - m_1$ грамів (це число від'ємне — адже маса радіоактивної речовини, що не розпалася, з часом зменшується).

Відношення

$$\frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1}$$

являє собою середню швидкість зміни маси радіоактивної речовини в пробірці за розглядуваний проміжок часу, тобто являє собою середню швидкість розпаду.

Чим менший проміжок часу $t_2 - t_1$, тим точніше це відношення виражає миттьову швидкість розпаду. Отже, ми можемо сказати, що *миттьова швидкість розпаду* $u(t_1)$ у момент t_1 дорівнює

$$u(t_1) = \lim \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1},$$

де границя береться при умові, що значення t_2 наближається до t_1. Цілком аналогічно можна визначити миттьову швидкість хімічної реакції.

ЧИ ВМІЄТЕ ВИ ПРОВОДИТИ ДОТИЧНУ

Почувши таке запитання, ви, очевидно, пригадаєте побудову дотичної до кола, що вивчалась у сьомому класі, і дасте позитивну відповідь. Але мова йде про дотичну до будь-якої кривої, а не тільки до кола. А в шкільних підручниках не тільки нічого не сказано про проведення дотичної до будь-якої кривої, але навіть не дається означення, що це таке. Не можна, звісно, означати дотичну як пряму, що має з кривою лише одну спільну точку: вісь параболи перетинається з нею тільки в одній точці (рис. 20), але навряд чи кому спаде на думку говорити, що ця вісь дотикається параболи.

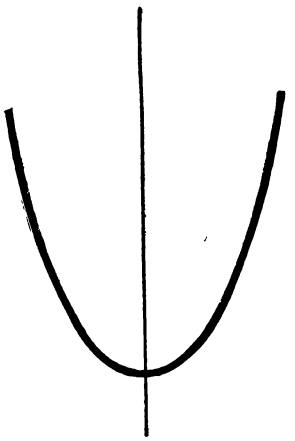


Рис. 20.

Що ж таке дотична до кривої і як її провести? Постараємося відповісти на ці запитання. Проведемо через точку M, що лежить на кривій, січну MN (рис. 21). Якщо тепер точку N наближати по кривій до точки M, то січна повертатиметься навколо точки M, чимраз більше наближаючись до деякої прямої. Ця пряма і є дотична до кривої в точці M. Для кола це означення дотичної збігається із звичайним (рис. 22): в міру наближення точки N до точки M кут OMN наближається до прямого кута, і тому дотична до кола перпендикулярна до радіуса.

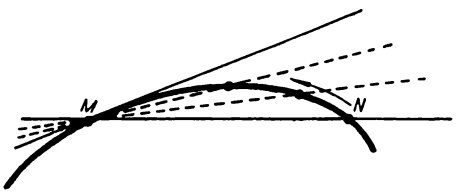


Рис. 21.

Отже, *дотична — це пряма, до якої наближається січна MN, коли точка N наближається (по розглядуваній кривій) до точки M.* Тепер нам неважко буде описати положення дотичної з допомогою деякої формули. Для цього вважатимемо, що крива AB є графіком деякої функції $y = f(x)$. Позначимо ординати точок M і N через y_1 і y_2, а їх абсциси — через x_1 і x_2. Розглядаючи прямокутний трикутник MNP з гіпотенузою MN і катетами, паралельними осям координат (рис. 23), ми можемо легко визначити кут, під яким січна MN нахилена до осі x:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{PN}{MP}.$$

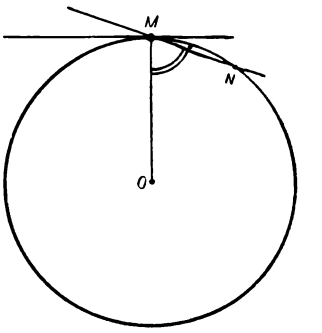


Рис. 22.

Але з рис. 23 ясно, що $PN = y_2 - y_1$, $MP = x_2 - x_1$. Таким чином,

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

Якщо тепер точка N почне по кривій AB наближатися до точки M, то січна MN буде, повертаючись, наближатися до положення дотичної, так що в границі ми дістанемо тангенс кута α, під яким дотична нахилена до осі x:

$$\operatorname{tg}\alpha = \lim \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

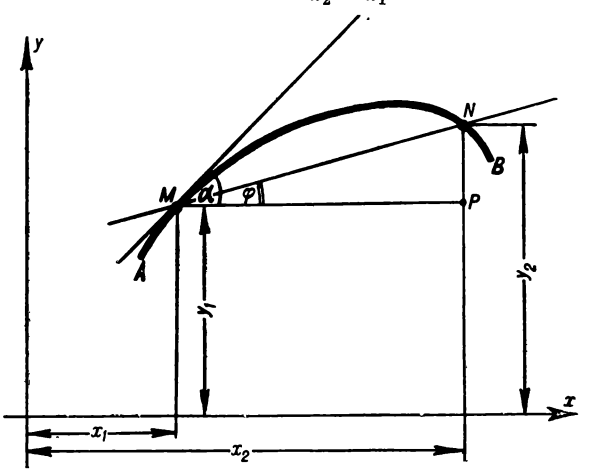


Рис. 23.

Границю беремо при умові, що точка N наближається до M, тобто що значення x_2 наближається до x_1.

ПОХІДНА

Ми розглянули кілька задач з фізики і геометрії. Незважаючи на зовнішню відмінність цих задач, у них було багато спільного. В перших двох задачах (швидкість руху,

швидкість розпаду) це спільне полягало в тому, що ми в обох випадках мали ш в и д к і с т ь з м і н и д е я к о ї в е л и ч и н и: швидкість руху є швидкість зміни шляху з часом, швидкість розпаду є швидкість зміни маси радіоактивної речовини. Але і в третьому прикладі ми мали деяку швидкість зміни: тангенс кута нахилу дотичної є швидкість зміни ординати, коли ми переміщуємося по осі x. Справді, відношення $\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}$ являє собою середню швидкість зростання ординати при переміщенні від точки x_1 до точки x_2, а граничне значення цього відношення (що дорівнює $\operatorname{tg}\alpha$) дає миттьову швидкість зміни ординати.

Отже, в усіх розглянутих задачах ми мали миттьову швидкість зміни деякої величини; цим і пояснюється, що при визначенні цих на перший погляд дуже не подібних величин ми дістали дуже подібні формули. Суто математично швидкість зміни можна визначити так. Нехай ми маємо функцію $y=f(x)$. Позначимо ті значення, яких ця функція набуває в двох точках x_1 і x_2, через y_1 і y_2. Тоді різниця y_2-y_1 показує, наскільки змінилося значення розглядуваної функції при переході від значення x_1 до значення x_2, а відношення $\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}$ являє собою середню швидкість зміни функції $y=f(x)$ на проміжку від x_1 до x_2. Якщо тепер зменшувати цей проміжок, наближаючи значення x_2 до x_1, то ми дістанемо в границі *миттьову швидкість зміни розглядуваної функції в точці* x_1; вона дорівнює

$$\lim \frac{y_2-y_1}{x_2-x_1},$$

де границю беремо при умові, що значення x_2 наближається до x_1. Ця миттьова швидкість зміни називається п о х і д н о ю від функції $y=f(x)$ по аргументу x у точці x_1; вона позначається через $f'(x_1)$.

У цих позначеннях явно вказується, в якій точці береться миттьова швидкість зміни (тобто похідна). Є й інші позначення для похідної, але ми їх не будемо вказувати. Звичайно, похідну можна знаходити в різних точках, так що похідна $f'(x)$ є знову деяка функція від x. Тепер ясно, що розглянуті вище задачі з фізики і геометрії можна сформулювати з допомогою похідної.

Швидкість руху $v(t)$ є похідна від шляху $s(t)$ по часу:

$$v(t)=s'(t). \tag{9}$$

Швидкість $u(t)$ радіоактивного розпаду є похідна від маси радіоактивної речовини $m(t)$ по часу:

$$u(t)=m'(t). \tag{10}$$

Нарешті, тангенс кута нахилу дотичної до графіка функції $y=f(x)$, проведеної в точці з абсцисою x, є похідна від функції $f(x)$ по x:

$$\operatorname{tg}\alpha\,|_{\text{у точці }x}=f'(x). \tag{11}$$

ПОХІДНІ МНОГОЧЛЕНІВ

З сказаного вище ясно, що вміти знаходити похідні різних функцій (знаходження похідних називається диференціюванням) має дуже важливе значення для розв'язування ряду задач фізики, геометрії та інших наук. Ми розглянемо зараз приклад безпосереднього обчислення похідної.

Візьмемо функцію $y=x^3$. Відношення, яке треба розглянути при обчисленні цієї похідної, має такий вигляд:

$$\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}=\frac{x_2^3-x_1^3}{x_2-x_1}=\frac{(x_2-x_1)(x_2^2+x_2x_1+x_1^2)}{x_2-x_1}=$$
$$=x_2^2+x_2x_1+x_1^2.$$

Якщо тепер x_2 наближатиметься до x_1, то останній вираз, очевидно, наближатиметься до значення $x_1^2+x_1^2+x_1^2=3x_1^2$. Таким чином, похідна від функції $y=x^3$ має в точці $x=x_1$ значення $3x_1^2$, тобто $(x^3)'\,|_{\text{при }x=x_1}=3x_1^2$. Коротше це записують так: $(x^3)'=3x^2$.

Рекомендуємо читачеві таким же способом знайти похідні від функцій $y=x^2$ і $y=x$. Результати виходять такі:

$$(x^2)'=2x;\ (x)'=1.$$

Ці формули обчислення похідних, очевидно, можна об'єднати в одну загальну формулу

$$(x^n)'=nx^{n-1}. \tag{12}$$

Для випадку цілого додатного значення n цю формулу можна перевірити приблизно таким же способом, яким було обчислено похідну від x^3. У вищій математиці подається доведення справедливості формули (12) при будь-якому n. Зауважимо, що похідна одиниці (або взагалі будь-якої сталої величини) дорівнює нулеві. Це легко виходить з формули (12), та, між іншим, ясно і без цього, бо швидкість зміни сталої величини очевидно дорівнює нулеві.

Зауважимо тепер, що похідна має такі прості, але важливі властивості: *сталий множник можна виносити за знак похідної*; *крім того, похідна суми двох (або кількох) функцій дорівнює сумі похідних від доданків*:

$$[kf(x)]' = k \cdot f'(x),$$
$$[f_1(x) + f_2(x)]' = f_1'(x) + f_2'(x).$$

Справедливість цих правил легко проілюструвати з допомогою формули (9) приблизно так само, як ми зробили вище для інтегралів.

Тепер уже легко можна знаходити похідні будь-яких многочленів. Наприклад,

$$(3x^3 - 2x^2 + 5x - 4)' = (3x^3)' + (-2x^2)' + (5x)' + (-4)' = 3(x^3)' - 2(x^2)' + 5(x)' - 4(1)' = 3 \cdot 3x^2 - 2 \cdot 2x + 5 \cdot 1 - 4 \cdot 0 = 9x^2 - 4x + 5.$$

Взагалі, якщо $f(x) = a_0x^n + a_1x^{n-1} + \ldots + a_{n-1}x + a_n$ — многочлен n-го степеня, то його похідна обчислюється за формулою

$$f'(x) = na_0x^{n-1} + (n-1)a_1x^{n-2} + \ldots + a_{n-1}.$$

БДЖОЛИ-МАТЕМАТИКИ

Великий російський математик П. Л. Чебишев у своїй праці «Креслення географічних карт» писав, що особливо важливі ті методи науки, які дозволяють розв'язувати задачу, загальну для всієї практичної діяльності людини, *як діяти засобами своїми для досягнення по можливості більшої вигоди*. Так, робітник-металіст намагається з наявного куска металу зробити якнайбільше деталей; розкрійник на взуттєвій фабриці намагається з куска шкіри викроїти якнайбільше заготовок; технолог намагається так розставити верстати на заводі, щоб обробка деталей зайняла якнайменше часу, і т. д.

Та і не тільки людині доводиться розв'язувати такі задачі. Бджоли несвідомо розв'язують одну з таких задач — вони намагаються надати стільникам такої форми, щоб при заданому об'ємі на них пішло якнайменше воску. І хоч вони не знають математики, але точно розв'язують цю задачу (рис. 24).

Рис. 24.

Бджолам допомагає розв'язати цю задачу інстинкт. Людина ж відрізняється від бджіл тим, що вона діє не з інстинкту, а з розуму. Маркс говорив, що «найгірший архітектор від найкращої бджоли з самого початку відрізняється тим, що, перш ніж будувати комірку з воску, він уже побудував її у своїй голові».

І велику допомогу в розв'язанні таких задач подає людині математика, особливо поняття похідної. Щоб зрозуміти, як же математики розв'язують такі задачі, розглянемо одну з них.

ЯК ЗРОБИТИ НАЙБІЛЬШУ КОРОБКУ

Нехай перед нами квадратний кусок картону з стороною a. З нього нам треба зробити коробку без кришки. Виріжемо по кутах куска квадратики (рис. 25) і зігнемо по лініях, позначених пунктиром. У нас вийшла коробка (рис. 26), але чи багато в неї можна покласти? А це залежить від того, які квадратики ми вирізали з цієї коробки. Якщо вони були дуже маленькі, то коробка вийде низька (рис. 27, *а*) і в неї багато не покладеш. А якщо вони будуть надто великі (рис. 27, *б*), то коробка вийде надто вузька і в неї теж ввійде досить мало. Знайдемо, при якій стороні x вирізаного квадратика об'єм $V(x)$ зробленої коробки буде найбільший. З рис. 26 видно, що $V = x(a - 2x)^2 = 4x^3 - 4ax^2 + a^2x$. Графік цієї функції поданий на рис. 28. При цьому x повинен лежати між 0 і $\frac{a}{2}$, бо вирізати з куска картону з стороною a чотири квадрати з стороною, більшою як $\frac{a}{2}$, не можна.

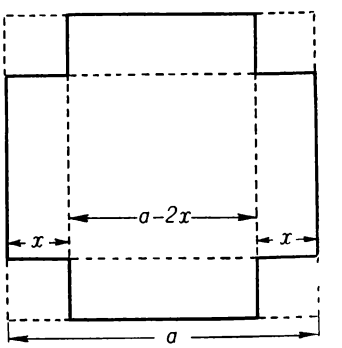


Рис. 25.

З рис. 28 видно, що в тій точці, де значення об'єму найбільше, дотична йде горизонтально, тобто утворює з віссю x кут, що дорівнює нулеві. Але це значить, що в цій точці похідна дорівнює нулеві. Таким чином, щоб знайти значення x_{max}, при якому об'єм коробки буде найбільший, треба знайти всі значення x, при яких похідна функції $V(x) = 4x^3 -$

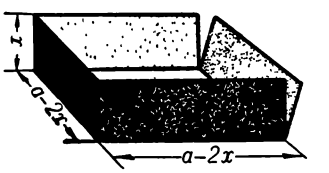


Рис. 26.

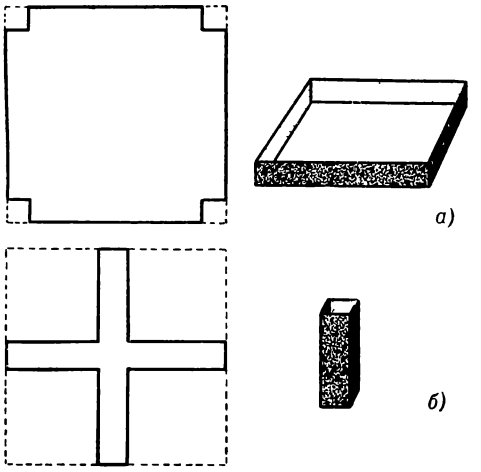


Рис. 27.

$-4ax^2 + a^2x$ перетворюється в нуль; серед них обов'язково буде і шукане значення x_{max}. За формулою диференціювання многочлена знаходимо:

$$V'(x) = 12x^2 - 8ax + a^2.$$

Прирівнюємо похідну до нуля і знаходимо два корені $x_1 = \frac{a}{2}$, $x_2 = \frac{a}{6}$. Звісно, корінь $x_1 = \frac{a}{2}$ нас не влаштовує: якщо ми виріжемо квадрати з стороною $\frac{a}{2}$, то від аркуша картону нічого не залишиться. Отже, найбільше значення об'єму дістанемо, якщо за x_{max} приймемо значення $\frac{a}{6}$, що залишилося, тобто виріжемо квадрати з стороною $x = \frac{a}{6}$. Об'єм коробки тоді дорівнюватиме $\frac{2a^3}{27}$. Зробити з нашого куска картону коробку більшого об'єму неможливо.

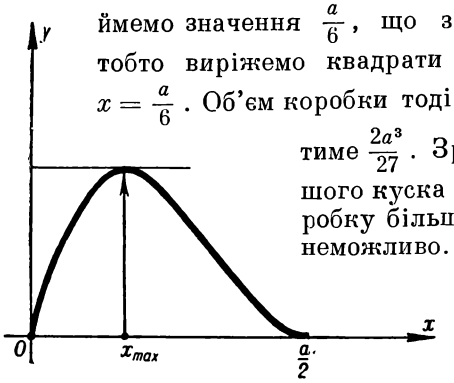


Рис. 28.

БАЛКА НАЙБІЛЬШОЇ МІЦНОСТІ

Основним елементом будь-якої будівельної конструкції є балка. Міцність балки залежить від того, яку форму має її поперечний переріз. При цьому висота перерізу відіграє значно більшу роль, ніж її ширина (набагато важче зігнути лінійку, поставлену на ребро, ніж лінійку, що лежить плазом) (рис. 29). Інженерні розрахунки показують, що міцність балки з прямокутним перерізом пропорціональна ширині балки a і квадратові її висоти h. Інакше кажучи, міцність такої балки (виміряна в деяких одиницях) дорівнює kah^2, де k — коефіцієнт, який залежить від довжини балки, матеріалу, з якого вона зроблена, і т. д.

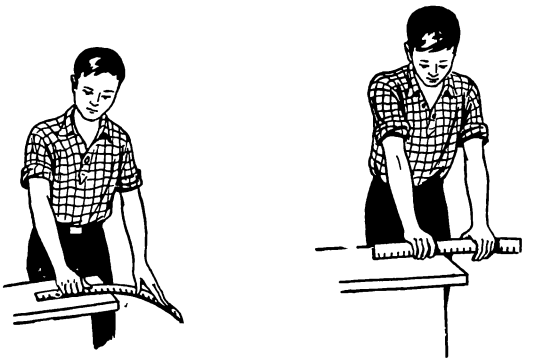


Рис. 29.

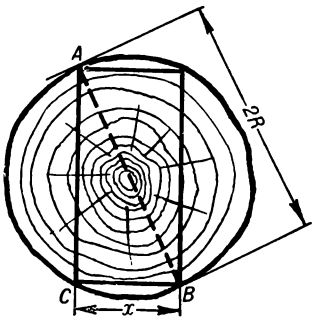


Рис. 30.

Дерев'яні балки доводиться звичайно витесувати з круглих колод. У зв'язку з цим виникає питання, як з колоди радіусом R зробити балку найбільшої міцності. На рис. 30 зображений поперечний переріз колоди. Звісно, міцність вирізаної балки буде функцією від ширини цієї балки. Але якщо взяти ширину надто велику (майже таку, що дорівнює діаметру колоди), то вийде балка дуже маленької

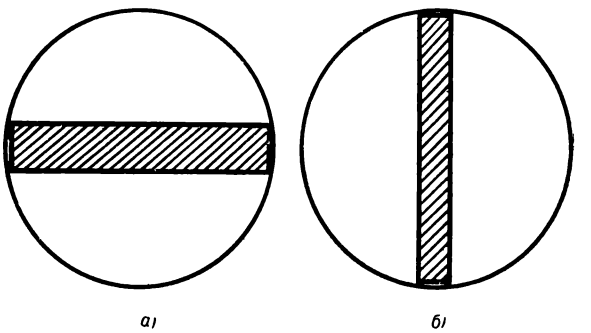


Рис. 31.

висоти і міцність її буде незначна (рис. 31, *а*). Мала буде міцність балки і якщо зробити її надто вузькою (рис. 31, *б*). Щоб знайти, при якому співвідношенні довжини і ширини міцність буде найбільшою, виразимо міцність балки як функцію від її ширини x. З трикутника ABC, зображеного на рис. 30, видно, що висота балки з шириною x дорівнює $\sqrt{4R^2 - x^2}$. Тому міцність такої балки дорівнює

$$kx(4R^2 - x^2) = 4R^2kx - kx^3.$$

Графік функції $y = 4R^2kx - kx^3$ поданий на рис. 32; її похідна дорівнює $4R^2k - 3kx^2$ і перетворюється в нуль при $x_{1,2} = \pm\frac{2R\sqrt{3}}{3}$.

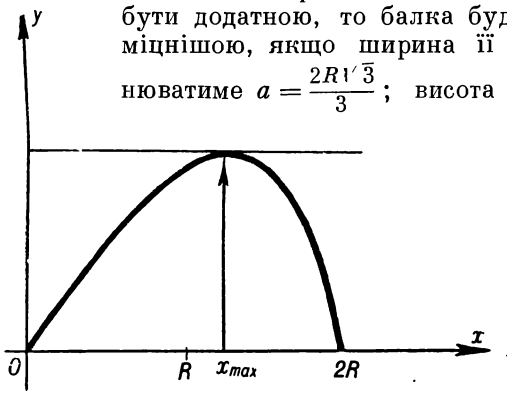


Рис. 32.

Оскільки ширина балки повинна бути додатною, то балка буде найміцнішою, якщо ширина її дорівнюватиме $a = \frac{2R\sqrt{3}}{3}$; висота балки визначиться за формулою $h = \sqrt{4R^2 - a^2} = \frac{2R\sqrt{6}}{3}$.

Відношення $\frac{h}{a}$ дорівнює $\sqrt{2} \approx \frac{7}{5}$. Саме таке відношення висоти балки до ширини і передбачено правилами виконання будівельних робіт.

ФОРМУЛА НЬЮТОНА — ЛЕЙБНІЦА

Між диференціюванням та інтегруванням є глибокий зв'язок: формула (3) показує, що шлях знаходять за миттьовою швидкістю з допомогою інтегрування, а формула (9) твердить, що швидкість знаходять за шляхом з допомогою диференціювання. Це наводить на думку, що дії диференціювання та інтегрування зв'язані одна з одною приблизно так само, як дії додавання і віднімання, множення та ділення, піднесення до степеня і добування кореня, тобто що ці операції взаємно обернені. Так воно і є насправді.

Наприклад, користуючись тим, що $v(t) = s'(t)$, можна записати формулу (3) у вигляді

$$s = \int_0^T s'(t)\,dt.$$

Тут s — шлях, пройдений тілом, починаючи з моменту $t = 0$. Але може статися і так, що пройдений шлях відлічується не з моменту $t = 0$, а з якогось більш раннього моменту (наприклад, не з моменту початку мандрівки, а з моменту випуску автомобіля із заводу). Тоді шлях s доведеться записати у вигляді різниці $s(T) - s(0)$ шляху, пройденого на момент $t = T$, і шляху, пройденого до моменту $t = 0$. Рівність (3) набере тоді такого вигляду:

$$s(T) - s(0) = \int_0^T s'(t)\,dt.$$

Так само для будь-яких двох моментів часу $t = a$ і $t = b$ справедлива рівність

$$s(b) - s(a) = \int_a^b s'(t)\,dt.$$

Взагалі для будь-якої функції $F(x)$ справедлива рівність

$$F(b) - F(a) = \int_a^b F'(x)\,dx.$$

Ця формула називається формулою Ньютона — Лейбніца на честь знаменитих математиків Ньютона і Лейбніца, які майже одночасно встановили цю формулу наприкінці XVII ст. (приблизно через 70 років після виходу в світ книги Кеплера «Стереометрія винних бочок»). Слід сказати, що в геометричній формі цю формулу висловив учитель Ньютона Барроу в 1670 р. Він вказав, що обчислення площ — дія, обернена проведенню дотичних.

Значення формули Ньютона — Лейбніца полягає ось у чому: якщо ми знаємо яку-небудь функцію $F(x)$, похідна якої дорівнює $f(x)$, тобто $F'(x) = f(x)$, то легко обчислити інтеграл $\int_a^b f(x)\,dx$ — він дорівнює різниці значень функції $F(x)$ в точках b і a. Кожну функцію $F(x)$, для якої $F'(x) = f(x)$, називають *первісною* (примітивною) для функції $f(x)$. Отже, якщо функція $F(x)$ — первісна для функції $f(x)$, то $f(x)$ — похідна для функції $F(x)$.

Таким чином, обчислення інтегралів зводиться, в основному, до знаходження первісних. А знаходження первісної є задача, обернена диференціюванню. Тому чим більше число функцій ми вмітимемо диференціювати, тим більше первісних ми знатимемо і тим більше інтегралів зможемо знайти. Поки що ми вміємо диференціювати тільки многочлени. Цього вже досить, щоб інтегрувати будь-які многочлени (не вдаючись до застосованих вище геометричних прийомів).

Але у багатьох задачах зустрічаються функції, відмінні від многочленів. Ми навчимося зараз диференціювати показникову і тригонометричні функції.

ПОХІДНІ СИНУСА І КОСИНУСА

Похідні від тригонометричних функцій найпростіше обчислити, виходячи з фізичних міркувань. Розглянемо точку A, яка рухається по колу радіуса R з швидкістю ωR. Вважатимемо, що при $t = 0$ точка A була в положенні A_0 (рис. 33). Через t секунд точка пройде шлях довжиною ωRt і опиниться в положенні A. Дуга A_0A має довжину ωRt, тобто містить ωt радіанів, отже, і кут AOA_0 дорівнює ωt радіанів. Тому координати точки A дорівнюють $x = R\cos\omega t$ і $y = R\sin\omega t$ (це легко вивести з трикутника ABO). Інакше кажучи, проекція B точки A на вісь Ox рухається за законом $x = R\cos\omega t$, а проекція C цієї ж точки на вісь Oy рухається за законом $y = R\sin\omega t$. Знайдемо швидкості цих коливань. Для цього розкладемо швидкість руху точки A на дві складові: горизонтальну і вертикальну. Вектор швидкості точки A (що має довжину ωR) напрямлений по дотичній до кола, проведеній у точці A, і тому утворює з віссю Ox кут $\omega t + \frac{\pi}{2}$, а з віссю Oy — кут ωt (рис. 34). Отже, його проекція на вісь Ox (тобто швидкість руху точки B) дорівнює

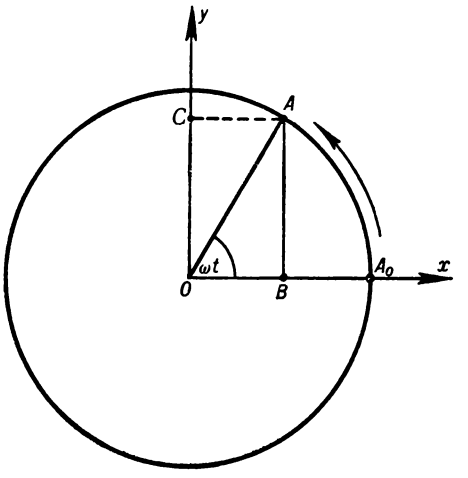


Рис. 33.

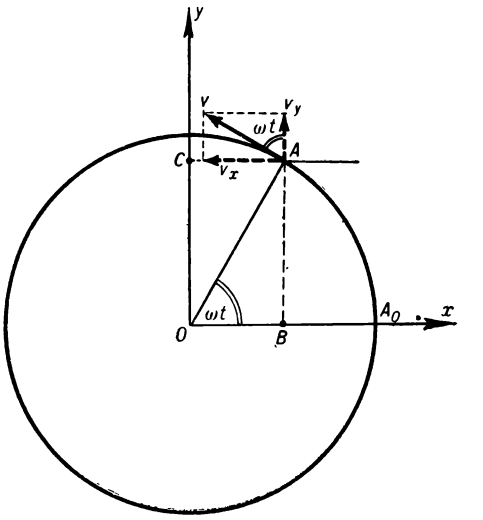


Рис. 34.

$$v_x = \omega R\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -\omega R\sin\omega t,$$

а його проекція на вісь Oy (тобто швидкість руху точки C) дорівнює

$$v_y = \omega R\cos\omega t.$$

Ми довели тим самим, що швидкість коливання, яке відбувається за законом $x = R\cos\omega t$, дорівнює $v_x = -\omega R\sin\omega t$. Через те що швидкість є похідною від шляху по часу, то це означає, що

$$(R\cos\omega t)' = -\omega R\sin\omega t,$$

або, при $R = 1$,

$$(\cos\omega t)' = -\omega\sin\omega t. \qquad (13)$$

Так само доводимо (з розгляду руху точки C), що

$$(\sin\omega t)' = \omega\cos\omega t. \qquad (14)$$

Зокрема, при $\omega = 1$ маємо:

$$(\cos t)' = -\sin t, \quad (\sin t)' = \cos t.$$

ПОХІДНА ПОКАЗНИКОВОЇ ФУНКЦІЇ

Тепер продиференціюємо показникову функцію $y = e^x$. Ми вже знаємо (див. статтю «Функції у природі і техніці»), що дотична до кривої $y = e^x$, проведена в точці перетину її з віссю ординат, нахилена до осей під кутом в 45°. Пригадуючи геометричний зміст похід-

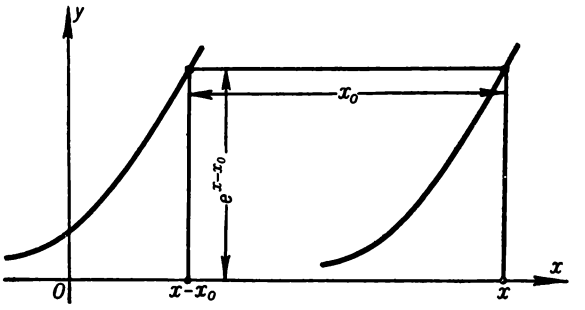


Рис. 35.

ної (див. стор. 163—164), ми можемо сказати, що похідна функції $y = e^x$ у точці $y = 0$ дорівнює tg 45°, тобто 1. Отже, $(e^x)'|_{\text{при } x=0} = 1$.

Щоб підрахувати похідну від функції $y = e^x$ в якій-небудь точці x_0, зсунемо графік цієї функції на відрізок x_0. Після зсуву в точці x ордината дорівнюватиме не e^x, а e^{x-x_0}, тобто зсунута крива є графіком функції $y = e^{x-x_0}$ (рис. 35). При зсуві графіка дотична, проведена до кривої $y = e^x$ в точці $x = 0$, перейде в дотичну, проведену до зсунутої кривої (тобто кривої $y = e^{x-x_0}$) в точці $x = x_0$ (рис. 36).

Таким чином, дотична до кривої $y = e^{x-x_0}$ в точці x_0 нахилена до осі x під кутом 45°, тобто

$$(e^{x-x_0})'|_{\text{при } x=x_0} = 1.$$

Тепер легко знайти похідну функції $y = e^x$ в точці $x = x_0$. Справді, через те що сталий

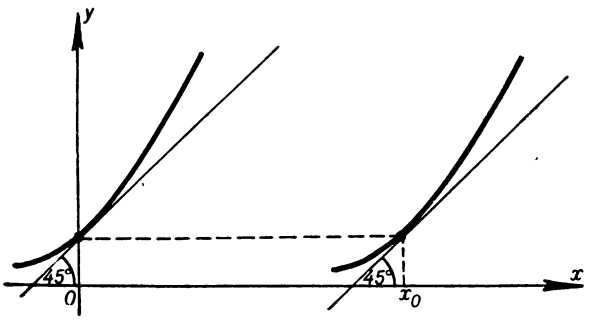


Рис. 36.

множник e^{x_0} можна винести за знак похідної, то ми дістанемо

$$(e^x)'|_{\text{при } x=x_0} = (e^x e^{x-x_0})'|_{\text{при } x=x_0} = e^{x_0}(e^{x-x_0})'|_{\text{при } x=x_0} = e^{x_0} \cdot 1 = e^{x_0}.$$

Цим доведено, що похідна від функції $y = e^x$ в точці $x = x_0$ дорівнює e^{x_0}.

Через те що x_0 — довільна точка, то ми можемо просто написати

$$(e^x)' = e^x.$$

Лише не набагато складніші міркування показують, що

$$(e^{cx})' = ce^{cx}. \qquad (15)$$

РАДІОАКТИВНИЙ РОЗПАД

Багато фізичних законів зв'язують між собою деяку величину і швидкість її зміни. Розглянемо, наприклад, радіоактивний розпад. Швидкість розпаду тим більша, чим більше взято радіоактивної речовини. Це і зрозуміло: якщо, скажімо, в кожному грамі взятої радіоактивної речовини за 1 сек. розпадається 0,0001 *г*, то в двох грамах цієї речовини за 1 сек. розпадеться 0,0002 *г*, а в семи грамах розпадеться за 1 сек. 0,0007 *г* і т. д. Інакше кажучи, швидкість розпаду [ми її позначили вище буквою u, див. формулу (10)] прямо пропорціональна масі m наявної радіоактивної речовини:

$$u = -km. \qquad (16)$$

Тут k — додатний коефіцієнт пропорціональності, а знак мінус поставлено тому, що речовина розпадається і її стає менше, тобто швидкість розпаду від'ємна. (Цей закон, що зв'язує масу радіоактивної речовини і швидкість розпаду, справедливий лише у випадку, якщо кількість радіоактивної речовини не надто велика і не відбувається «ланцюгова реакція»; докладніше про це ви прочитаєте в статті «Будова атома і атомна енергія»).

На перший погляд здається, що з рівняння (16) нічого не можна визначити: адже це одне рівняння з двома невідомими u і m (коефіцієнт пропорціональності k для кожного виду радіоактивної речовини визначається з досліду), а для знаходження двох невідомих треба мати два рівняння. Однак друге рівняння легко знайти: адже u — це швидкість зміни маси m, а тому $u = m'$. Отже, ми можемо переписати закон радіоактивного розпаду [тобто формулу (16)] у вигляді

$$m' = -km. \qquad (17)$$

Ми дістали одне рівняння для визначення однієї невідомої m. Тільки це рівняння не таке, як ті, що вивчаються в школі: воно зв'язує величину m та її швидкість зміни (похідну). Рівняння, які зв'язують величини та їх похідні, називаються диференціальними рівняннями.

Легко перевірити, що функція $m = Ce^{-kt}$, де C — будь-яке число, є розв'язком диференціального рівняння (17) (тобто якщо підставити в це рівняння замість m цю функцію, то воно перетвориться в тотожність). Справді,

$$m' = (Ce^{-kt})' = -Cke^{-kt} = -km.$$

Можна показати, що інших функцій (крім $m(t) = Ce^{-kt}$), які задовольняють рівняння (17), *не існує*, тобто що всякий розв'язок рівняння (17) має вигляд $m(t) = Ce^{-kt}$. Це і є закон зменшення маси радіоактивної речовини з часом.

У нас залишилося нез'ясованим одне питання: чому дорівнює стала C? На це питання неважко відповісти. З формули $m(t) = Ce^{-kt}$ знаходимо (беручи $t = 0$), що маса радіоактивної речовини в початковий момент часу $t = 0$ дорівнювала $Ce^0 = C$. Таким чином, C — це маса радіоактивної речовини в початковий момент часу; її прийнято позначати через m_0. Тому, заміняючи C на m_0, дістаємо остаточний вигляд закону радіоактивного розпаду:

$$m(t) = m_0 e^{-kt}. \qquad (18)$$

Знайдемо тепер, через скільки років кількість радіоактивної речовини зменшиться вдвоє. Для цього треба визначити число T_0 з рівняння $e^{-kT_0} = \frac{1}{2}$. Після логарифмування (за основою e) знаходимо, що $T_0 = \frac{1}{k} \ln 2 \approx \frac{0{,}69}{k}$ (через $\ln x$ ми позначаємо логарифм числа x за основою e). Цей проміжок часу T_0 називають періодом піврозпаду даної радіоактивної речовини. Зауважимо, що цей проміжок часу не залежить від того, скільки було взято радіоактивної речовини, а залежить тільки від k, тобто від того, яку взято речовину. Наприклад, період піврозпаду радію дорівнює 1590 рокам, період піврозпаду урану-238 дорівнює 4,5 млрд. років, а період піврозпаду торію C становить всього 0,0000003 сек.

З допомогою числа T_0 закон радіоактивного розпаду можна записати так:

$$m(t) = m_0 (e^{-kT_0})^{\frac{t}{T_0}} = m_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_0}}.$$

У цій формі його звичайно і застосовують у фізиці.

ПОКАЗНИКОВА ФУНКЦІЯ В ПРИРОДІ І ТЕХНІЦІ

Є величезна кількість процесів у природі, які описуються такими ж диференціальними рівняннями, як рівняння (17) для радіоактивного розпаду. Спільним для всіх цих процесів є те, що швидкість зміни розглядуваної величини y прямо пропорціональна значенню цієї величини в даний момент часу, тобто

$$y' = cy. \qquad (19)$$

Коефіцієнт пропорціональності c додатний або від'ємний залежно від того, збільшуються чи зменшуються з часом значення величини y. Диференціальне рівняння (19) має такий же вигляд, як і рівняння радіоактивного розпаду (тільки коефіцієнт пропорціональності тут позначається через c, а не через $-k$). Через те що однакові рівняння мають однакові розв'язки, то для всіх таких процесів значення y в перший-ліпший момент часу t виражаються формулою

$$y(t) = y_0 e^{ct},$$

де y_0 — значення величини y при $t = 0$.

Тепер стає зрозумілим, чому в природі і техніці зустрічається так багато величин, які змінюються за показниковим законом (струм самоіндукції, який тече в котушці після вимикання постійної напруги; зміна тиску з висотою піднімання і т. д., див. статтю «Функції в природі і техніці»). Всі ці величини задовольняють диференціальні рівняння виду (19).

ЛЕВЕР'Є ТА АДАМС ВІДКРИВАЮТЬ НОВУ ПЛАНЕТУ

За другим законом Ньютона сила дорівнює добуткові маси на прискорення:

$$F = ma.$$

Але прискорення тіла, що рухається прямолінійно, являє собою «швидкість зміни швидкості», тобто є похідною від швидкості $a = v'$. Сама ж швидкість є похідною від пройденого шляху: $v = s'$. Таким чином, щоб знайти прискорення рухомого тіла, треба два рази продиференціювати функцію $s(t)$. Тому прискорення називають другою похідною від шляху по часу. Позначають це так:

$$a(t) = s''(t).$$

Користуючись цим позначенням, ми можемо записати другий закон Ньютона в такому вигляді:

$$F = ms''.$$

Сила F залежить від багатьох обставин: від часу, від швидкості руху, від того, в якій точці простору перебуває рухоме тіло. Наприклад, на парашутиста, який спускається з розкритим парашутом, діють сила тяжіння mg і сила опору повітря, яку можна вважати пропорціональною швидкості падіння, тобто такою, що дорівнює $-kv$. Таким чином, загальна сила, яка діє на парашутиста, дорівнює

$$F = mg - kv = mg - ks'.$$

Отже, рух парашутиста описується диференціальним рівнянням

$$ms'' = mg - ks'.$$

Інший вигляд має рівняння руху ракети, яка вертикально піднімається за інерцією після повного згоряння пального. Сила притягання ракети до Землі обернено пропорціональна квадрату відстані ракети від центра Землі, тобто

$$F = -\frac{k}{s^2}$$

(ми вважаємо, що ракета вийшла із земної атмосфери і тому на неї не діє сила опору повітря).

Таким чином, вказаний рух ракети описується диференціальним рівнянням

$$ms'' = -\frac{k}{s^2},$$

де m — маса ракети. (Цим рівнянням описується також вертикальне падіння метеорита на Землю до входження його в атмосферу).

Взагалі другий закон Ньютона дає змогу описувати найрізноманітніші рухи тіл з допомогою диференціальних рівнянь. Можна написати диференціальні рівняння для руху поршня парової машини, корабля в морі, планети навколо Сонця, штучного супутника навколо Землі.

Розв'язуючи диференціальні рівняння руху планет і їх супутників (ці рівняння дуже складні, бо планети притягуються не тільки до Сонця, а й одна до одної), вчені передбачають їх майбутній рух, узнають моменти сонячних і місячних затемнень. Коли одного разу виявилося, що планета Уран відхиляється від заздалегідь обчисленої орбіти, вчені нітрохи не усумнилися в «правильності» математики. Французький астроном Левер'є та англійський астроном Адамс одночасно і незалежно один від одного зробили сміливе припущення, що відхилення Урана спричиняється притяганням нової, досі невідомої планети. З допомогою диференціальних рівнянь вони обчислили положення цієї нової планети і вказали, де треба її шукати на небі. Точно у вказаному місці ця нова планета (її назвали Нептуном) була потім виявлена.

РІВНЯННЯ ГАРМОНІЧНИХ КОЛИВАНЬ

У багатьох випадках тіла здійснюють коливання біля стану рівноваги під дією сили, величина якої пропорціональна відхиленню тіла від стану рівноваги і яка намагається повернути це тіло в стан рівноваги. Наприклад, це має місце для вантажу, підвішеного на пружині.

Рис. 37.

Інакше кажучи, сила, що діє на тіло, виражається формулою

$$F = -ks,$$

де s — відхилення тіла від стану рівноваги, а k — жорсткість пружини. Тому (внаслідок другого закону Ньютона) диференціальне рівняння руху тіла має такий вигляд:

$$ms'' = -ks.$$

Позначивши додатне число $\frac{k}{m}$ через ω^2, ми зможемо записати це рівняння у вигляді

$$s'' = -\omega^2 s.$$

Останнє рівняння називається *рівнянням гармонічних коливань*, бо функція

$$s = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t \qquad (20)$$

при будь-яких C_1 і C_2 є його розв'язком.

Справді, за формулами (13) і (14) швидкість тіла, яке рухається за законом (20), дорівнює

$$v = s' = -C_1\omega \sin \omega t + C_2\omega \cos \omega t;$$

продиференціювавши ще раз, знайдемо прискорення:

$$s'' = -C_1\omega^2 \cos \omega t - C_2\omega^2 \sin \omega t = -\omega^2(C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t).$$

Але вираз, який стоїть у дужках, дорівнює s. Таким чином, взята функція s дійсно задовольняє рівняння $s'' = -\omega^2 s$. Можна довести, що всякий розв'язок цього рівняння має такий вигляд.

Отже, сила, яка пропорціональна відхиленню тіла від стану рівноваги і намагається повернути його в цей стан, викликає гармонічні коливання частоти ω, де $\omega^2 = \frac{k}{m}$ (m — маса тіла, k — коефіцієнт пропорціональності).

Для коливань електричного кола можна також записати аналогічний закон, тільки треба замінити масу тіла самоіндукцією котушки, шлях, пройдений тілом, — напругою на конденсаторі, а швидкість тіла — силою струму і т. д. (рис. 37). Оскільки закони, що керують цими явищами, цілком аналогічні, то й коливання, які виникають в обох випадках, записуються одними й тими ж формулами. А загасаючі коливання виникають, якщо, крім сили, що намагається повернути тіло в стан рівноваги, діє ще опір середовища, пропорціональний швидкості руху тіла (або опір електричного кола).

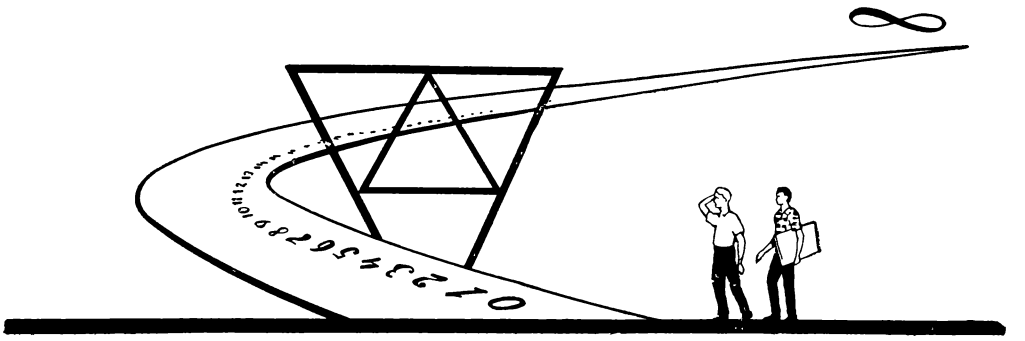
МОДЕЛЮВАННЯ

Той факт що найрізноманітніші явища описуються однаковими диференціальними рівняннями, часто використовується на практиці. Він дає змогу вивчати одні явища, спостерігаючи інші, якщо тільки обидва явища описуються однаковими рівняннями. Нехай, наприклад, треба з'ясувати, як рухатиметься під землею нафта в районі бурових свердловин. Спостерігати рух нафти під землею було б дуже важко.

Але рухи рідини описуються тими ж самими диференціальними рівняннями, що й рухи електричних зарядів. Тому складають електричне коло, в якому рухи електричних зарядів відбуваються так само, як рухи нафти, що вивчаються.

Вимірюючи напругу і величину струму в різних точках складеного кола, можна дізнатися, де найвигідніше поставити бурову вишку, куди треба накачувати воду, щоб посилити вихід нафти, і т. д.

Таке вивчення одних явищ за допомогою інших, які описуються тими ж самими рівняннями, називається моделюванням явищ. До нього часто вдаються в найрізноманітніших питаннях техніки.



Алгебра скінченного і нескінченного

На перший погляд може здатися сумнівним, щоб алгебра, та сама, в якій, як знає кожен школяр, усе формули та формули і немає рисунків, виявилась геометричною.

І все ж така алгебра існує вже понад сто років. Її розробляють математики для потреб фізики і для потреб самої математики. Майже всі початкові формули геометричної алгебри своїм виглядом добре знайомі кожному школяреві, проте букви, які входять у ці формули, мають незвичний зміст: вони позначають не числа, а «напрямлені відрізки», такі, які використовуються у фізиці для зображення сил, швидкостей, прискорень. Такі напрямлені відрізки математики називають в е к т о р а м и.

ГЕОМЕТРИЧНА АЛГЕБРА

У цій статті ми розповімо про деякі основні поняття і правила цієї алгебри (її називають в е к т о р н о ю а л г е б р о ю) і покажемо, як вона використовується для розв'язування різноманітних геометричних і фізичних задач, що їх важко розв'язати, користуючись тільки шкільною геометрією.

ГЕОМЕТРІЯ ДОПОМАГАЄ ФІЗИЦІ

Як з о б р а ж а ю т ь с и л и? Нагадаємо, що сила, прикладена до деякої точки P якого-небудь твердого тіла, зображається на рисунку н а п р я м л е н и м в і д р і з к о м PA із загостренням в точці A (рис. 1).

Н а п р я м цього відрізка, тобто напрям променя PP', на якому лежить відрізок PA, збігається з напрямом зображуваної сили.

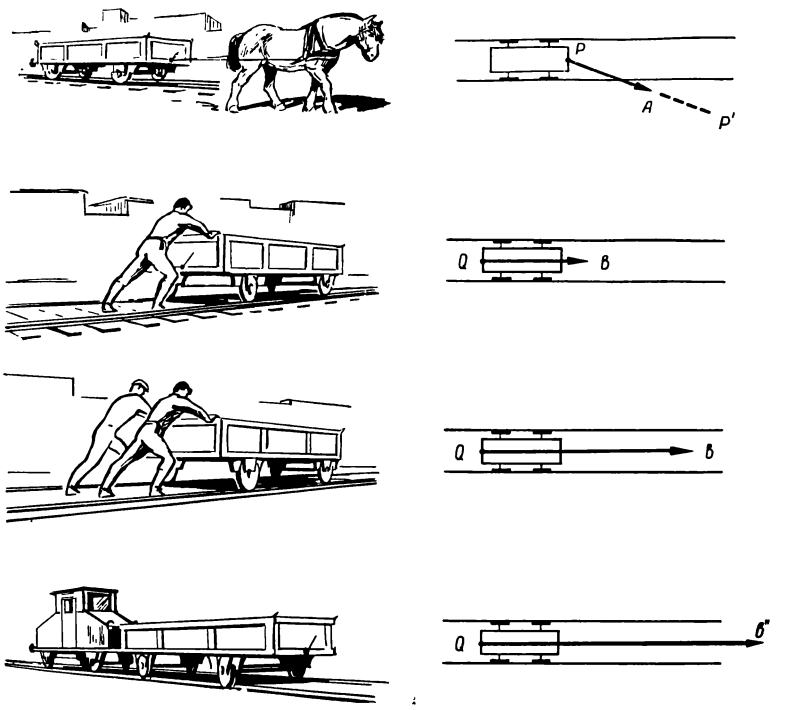


Рис. 1.

Довжину відрізка PA вибирають так, щоб у ньому вміщувалося стільки масштабних відрізків (наприклад, відрізків завдовжки в 1 *см*), скільки міститься масштабних одиничних сил (наприклад, сил, що дорівнюють 1 *кГ*) в зображуваній силі.

Напрямлений відрізок PA прийнято записувати так: $\overrightarrow{PA}$. Стрілка, поставлена зверху, повинна нагадати, що нас цікавить не тільки довжина напрямленого відрізка (цю довжину позначають або PA, або AP — байдуже), а також і його напрям. Напрямлений відрізок $\overrightarrow{PA}$ прийнято називати вектором. Точку P, тобто точку прикладання сили, називають початком вектора, точку A називають кінцем вектора.

Рівнодійна сила. Якщо до якої-небудь точки P прикладено дві сили різного напряму, то, як відомо з фізики, їх спільна дія рівносильна дії деякої єдиної сили, також прикладеної в точці P.

Величина цієї рівнодійної сили зовсім не дорівнює сумі величин двох вихідних сил. Виявляється, що вона менша, ніж їх сума.

Як же точно вказати напрям рівнодійної сили та її величину?

У вирішенні цього питання на допомогу фізиці приходить геометрія.

Численні фізичні досліди підтверджують правильність такого закону, формулювання якого (на це слід звернути увагу) стає можливим тільки завдяки геометричному способу зображення сил, про який було сказано вище: *рівнодійна двох сил, зображуваних векторами* $\overrightarrow{PA}$ *і* $\overrightarrow{PB}$, *зображається вектором* $\overrightarrow{PQ}$, *що є діагоналлю паралелограма, побудованого на напрямлених відрізках* $\overrightarrow{PA}$ *і* $\overrightarrow{PB}$ (рис. 2).

Таким чином, точна побудова вектора, який зображає рівнодійну двох сил, є простою геометричною операцією.

Як назвати? Операцію, з допомогою якої із заданих складових сил виникає їх рівнодійна, називають композицією сил, або додаванням сил, а рівнодійну — сумою двох сил.

Не слід, проте, забувати, що додавання сил (або додавання векторів) виконується зовсім за іншими правилами, ніж додавання чисел. З цієї причини його часто називають геометричним додаванням.

Як позначити? Природно, звичайно, скористатися позначеннями, прийнятими в арифметиці та алгебрі, і писати так:

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB} = \overrightarrow{PQ}, \qquad (1)$$

не забуваючи, звичайно, що знак «+» позначає в цій формулі зовсім не те, що він позначає, наприклад, у рівності

$$3 + 5 = 8.$$

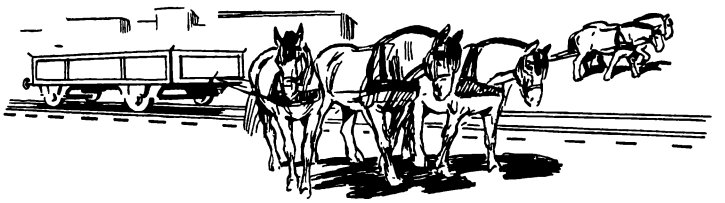
Звернемо увагу ось на що: рівнодійна сила виникає, якщо задано дві складові сили, але вона, звичайно, не залежить від того, в якому порядку ми записуємо ці сили. Тому замість рівності (1) можна написати

$$\overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PA} = \overrightarrow{PQ}.$$

Інакше кажучи:

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB} = \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PA}.$$

Ми дістали формулу, яка зовнішнім виглядом не відрізняється від відповідної алгеб-



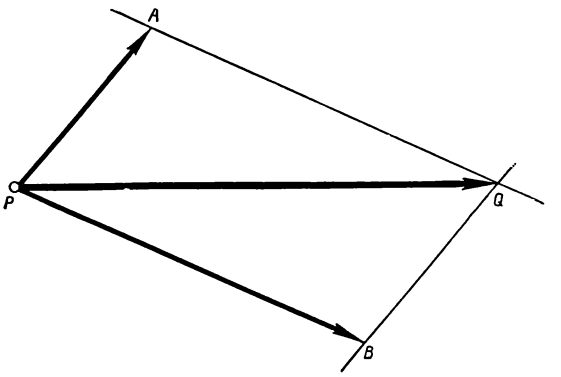


Рис. 2.

раїчної формули, що виражає комутативний закон додавання:

$$a + b = b + a.$$

Ці дві формули схожі тому, що для позначення геометричного додавання ми скористалися тим же знаком, яким користуються для зображення додавання в арифметиці і алгебрі.

Правило додавання векторів. Щоб додати вектори $\vec{PA}$ і $\vec{PB}$,

а) знайдемо насамперед середину C відрізка AB, що сполучає кінці додаваних векторів (рис. 3);

б) побудуємо точку Q, симетричну точці P відносно точки C, тобто на прямій PC знайдемо таку точку Q, щоб точка C була серединою відрізка PQ. В результаті такої побудови ми дістанемо діагональ PQ паралелограма, побудованого на заданих векторах $\vec{PA}$ і $\vec{PB}$, і тому

$$\vec{PQ} = \vec{PA} + \vec{PB}.$$

(Чотирикутник $PAQB$ являє собою справді паралелограм, бо внаслідок вказаної побудови його діагоналі ділять одна одну в точці C пополам).

Цінність правила середини (так його називають) полягає в тому, що воно дає змогу додавати вектори $\vec{PA}$ і $\vec{PB}$ і в тому випадку, коли вони лежать на одній прямій (побудова паралелограма на таких векторах, звичайно, неможлива).

З правила середини, очевидно, виходить, що:

в результаті додавання двох однаково напрямлених векторів $\vec{PA}$ і $\vec{PB}$ (рис. 4*а*) виходить вектор $\vec{PQ}$, який має той самий напрям, що й додавані вектори, і довжину, яка дорівнює сумі довжин додаваних векторів;

в результаті додавання двох протилежно напрямлених векторів $\vec{PA}$ і $\vec{PB}$ (рис. 4*б*) виходить вектор $\vec{PQ}$, що має напрям більшого (за довжиною) вектора-доданка і довжину, яка дорівнює різниці [1] довжин додаваних векторів.

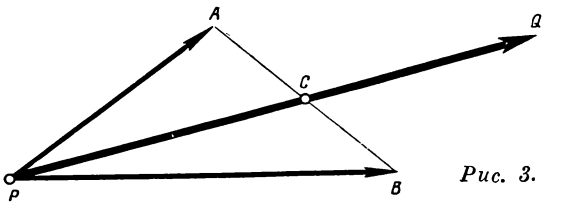


Рис. 3.

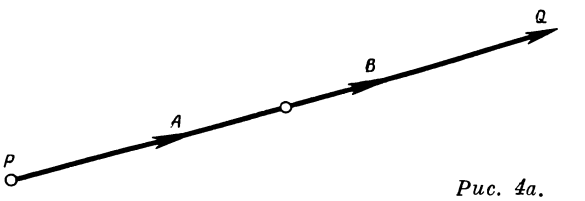


Рис. 4а.

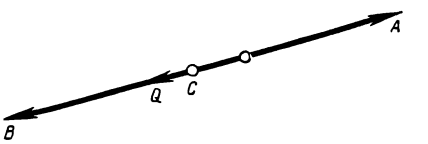


Рис. 4б.

Вектори $\vec{PA}$ і $\vec{PB}$, які лежать на одній прямій, незалежно від того, напрямлені вони в один і той же бік чи в протилежні, називають колінеарними. Правила їх додавання не суперечать тому, що показує фізичний

[1] Це зайвий раз нагадує про те, що ми маємо справу з геометричною сумою двох векторів, а не з арифметичною сумою двох чисел.

дослід при знаходженні рівнодійної двох колінеарних сил.

Дуже важливо! Особливу увагу слід приділити такому випадку, коли додавані вектори $\vec{PA}$ і $\vec{PB}$ не тільки протилежно напрямлені, але мають при цьому ще й рівні довжини (такі вектори називають р і в н о п р о т и л е ж н и м и).

Застосуємо правило середини:

1°. Будуємо середину C відрізка AB, вона збігається, очевидно, з точкою P (рис. 5).

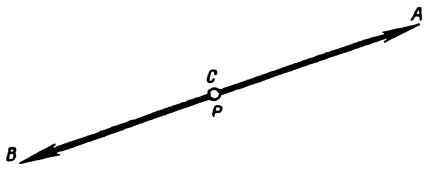


Рис. 5.

2°. Будуємо точку Q, симетричну точці P відносно точки C (тобто в даному разі точки P); дістаємо, що й точка Q збігається з точкою P.

Таким чином, якщо вектори $\vec{PA}$ і $\vec{PB}$ рівнопротилежні, то

$$\vec{PA} + \vec{PB} = \vec{PP}.$$

Ми дістали вектор особливого роду: його кінець збігається з його початком.

Можливо, перше почуття примусить читача поставитися з недовір'ям до такого вектора хоч би вже тому, що у нього немає напряму. Але якщо відмовитися від розгляду таких «особливих» векторів, то доведеться визнати, що не всякі два вектори можна додати, а це, звичайно, небажано.

Вважатимемо, що будь-які дві точки P і Q незалежно від того, різні вони чи збігаються, визначають напрямлений відрізок PQ.

Якщо точки P і Q різні, то треба, звичайно, вказати, яка з них вважається першою (початком), яка другою (кінцем), тобто потрібно, щоб ця пара точок була впорядкованою. Якщо ж точки P і Q збігаються, то потреба в указанні порядку слідування точок відпадає.

Щоб остаточно упевнитися в корисній ролі особливого вектора, переконайтеся, що

$$\vec{PA} + \vec{PP} = \vec{PA}, \qquad (2)$$

(доведення дістанемо відразу, якщо виконаємо додавання за правилом середини).

Ця рівність нагадує, звичайно, алгебраїчну рівність $a + 0 = a$ і переконує нас у тому, що особливий вектор $\vec{PP}$ відіграє в теорії векторного додавання таку ж роль, яку число «0» відіграє в арифметиці; тому особливий вектор $\vec{PP}$ прийнято називати н у л ь о в и м в е к т о р о м, або н у л ь - в е к т о р о м, і позначати його нулем. Тому рівність (2) запишеться так:

$$\vec{PA} + \vec{0} = \vec{PA}.$$

Кілька задач:

1) Відомо, що точка P перетину медіан трикутника ABC ділить кожну медіану у відношенні 2 : 1. Нехай до цієї точки P прикладено три сили, що зображаються векторами $\vec{PA}$, $\vec{PB}$ і $\vec{PC}$.

Визначити рівнодійну цієї системи сил.

В і д п о в і д ь. Сума даних сил дорівнює $\vec{PP}$, отже, ця система сил залишає точку P в рівновазі.

2) Точки A_1, A_2, A_3 ділять коло з центром у точці C на три рівні між собою дуги. Довести, що

$$(\vec{CA}_1 + \vec{CA}_2) + \vec{CA}_3 = \vec{CC}.$$

3) Довести, що коли точки A і C є протилежними вершинами паралелограма $ABCD$, то при будь-якому виборі точки P справедлива рівність

$$\vec{PA} + \vec{PC} = \vec{PB} + \vec{PD}.$$

4) Якщо три точки A, B, C різні і не лежать на одній прямій і якщо є ще четверта точка D, яка не збігається з першими трьома, то утворюється чотирикутник $ABCD$. Яким він повинен бути, щоб при будь-якому виборі точки P була справедлива рівність

$$\vec{PA} + \vec{PC} = \vec{PB} + \vec{PD}?$$

В і д п о в і д ь. Паралелограмом з протилежними вершинами A і C.

5) Через довільну точку P всередині кола з центром O проведені взаємно перпендикулярні хорди AB і CD. Знайти рівнодійну двох сил, прикладених у точці P і зображуваних векторами $\vec{PM}$ і $\vec{PN}$, де M і N — середини хорд AB і CD.

В і д п о в і д ь. Рівнодійну зображає вектор $\vec{PO}$.

ГЕОМЕТРІЯ СТВОРЮЄ НОВУ АЛГЕБРУ

Що таке сума трьох векторів? Відповідь ніби дуже проста! Щоб додати три вектори, досить додати два з них і до знайденого додати третій. Однак тут же виникає питання: які ж два вектори із заданих трьох додати в першу чергу? Чи вважати сумою трьох векторів $\vec{PA}$, $\vec{PB}$, $\vec{PC}$ вектор $(\vec{PA}+\vec{PB})+\vec{PC}$, або вектор $(\vec{PB}+\vec{PC})+\vec{PA}$, або, нарешті, вектор $(\vec{PC}+\vec{PA})+\vec{PB}$?

Аналогічне питання повинно було виникнути у читача ще при вивченні арифметики: як скласти суму трьох чисел? Чи вважати, що вона дорівнює $(a+b)+c$, чи $(b+c)+a$, чи, нарешті, $(c+a)+b$? Відповідь на це запитання добре відома. Для суми трьох чисел справедлива формула

$$(a+b)+c=a+(b+c),$$

яка виражає сполучний закон додавання.

Можливо, і векторне додавання має властивість сполучності, тобто справедлива формула

$$(\vec{PA}+\vec{PB})+\vec{PC}=\vec{PA}+(\vec{PB}+\vec{PC})? \quad (3)$$

Перевірка на прикладі (рис. 6*а*, 6*б*) підтверджує це припущення.

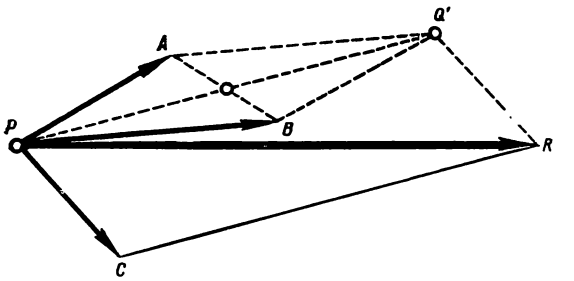


Рис. 6а.

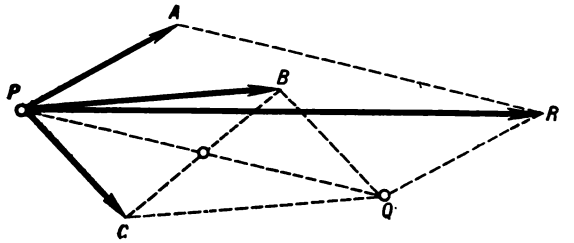


Рис. 6б.

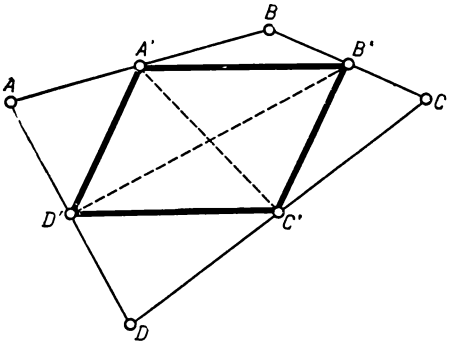


Рис. 7а.

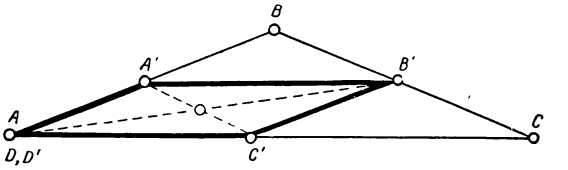


Рис. 7б.

Строге доведення формули (3) використовує одну просту геометричну теорему, яку легко довести:

Якщо A', B', C', D' — середини сторін AB, BC, CD, DA довільного чотирикутника, то середина відрізка $A'C'$ збігається з серединою відрізка $B'D'$.

При доведенні цієї допоміжної теореми треба розглянути всі можливі випадки розміщення вихідних чотирьох довільних точок A, B, C, D (два випадки відтворені на рис. 7*а* і 7*б*).

Звернемося тепер до доведення формули (3). Візьмемо три вектори $\vec{PA}$, $\vec{PB}$, $\vec{PC}$ (рис. 8*а*), побудуємо точки A', B', C', симетричні точці P відносно точок A, B, C відповідно, і позначимо буквами M і N середини сторін $A'B'$ і $B'C'$ чотирикутника $PA'B'C'$.

Візьмемо тепер до уваги, що середина відрізка AB збігається з серединою відрізка PM; це справедливо внаслідок згаданої вище допоміжної теореми, якщо застосувати її до чотирикутника $PA'B'C'$ (другий окремий випадок — він показаний на рис. 7*б*); тому, згідно з правилом середини,

$$\vec{PA}+\vec{PB}=\vec{PM}.$$

Нехай R — середина відрізка MC, а R' — точка, симетрична точці P відносно точки R. Тоді

$$(\vec{PA}+\vec{PB})+\vec{PC}=\vec{PM}+\vec{PC}=\vec{PR'}.$$

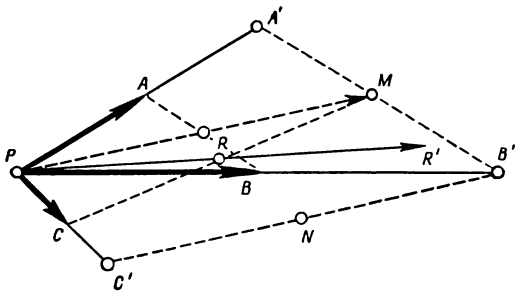


Рис. 8а.

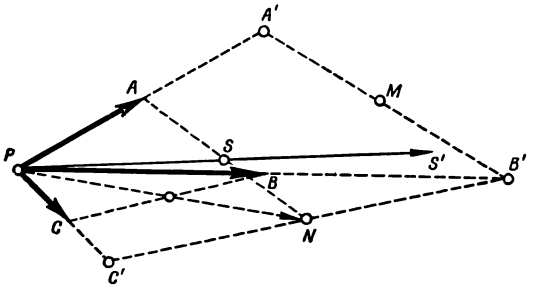


Рис. 8б.

Аналогічно маємо (рис. 8*б*): $\vec{PB}+\vec{PC}=\vec{PN}$, звідки

$$\vec{PA}+(\vec{PB}+\vec{PC})=\vec{PA}+\vec{PN}=\vec{PS'},$$

де S' — точка, симетрична точці P відносно середини S відрізка AN.

Візьмемо, нарешті, до уваги, що точки R і S збігаються — це справедливо внаслідок вказаної вище допоміжної теореми, якщо застосувати її до чотирикутника $PA'B'C'$; звідси PR' збігається з PS' і, отже,

$$(\vec{PA}+\vec{PB})+\vec{PC}=\vec{PA}+(\vec{PB}+\vec{PC}).$$

Тому прийнято опускати дужки і дію додавання трьох векторів записувати так:

$$\vec{PA}+\vec{PB}+\vec{PC}.$$

Сума багатьох векторів. Для додавання чотирьох векторів треба скласти суму трьох векторів і знайдений вектор додати до залишеного четвертого. Результат додавання не залежатиме від того, які вектори додаватимуться в першу чергу. Тепер це можна довести вже суто алгебраїчно. Переконаємося, наприклад, що

$$(\vec{PA}+\vec{PB}+\vec{PC})+\vec{PD}=\vec{PA}+(\vec{PB}+\vec{PC}+\vec{PD}).$$

Справді:

$$(\vec{PA}+\vec{PB}+\vec{PC})+\vec{PD}=\{\vec{PA}+(\vec{PB}+\vec{PC})\}+$$
$$+\vec{PD}=\vec{PA}+(\vec{PB}+\vec{PC})+\vec{PD}=\vec{PA}+$$
$$+\{(\vec{PB}+\vec{PC})+\vec{PD}\}=\vec{PA}+(\vec{PB}+\vec{PC}+\vec{PD}).$$

Легко переконатися, що правило сполучення в групи залишається справедливим і для будь-якого числа додаваних векторів. Тому їх суму прийнято позначати без дужок:

$$\vec{PA}_1+\vec{PA}_2+\ \dots\ +\vec{PA}_{n-1}+\vec{PA}_n.$$

Множення вектора на ціле додатне число. Наслідуючи те, що прийнято в шкільній алгебрі, умовимося користуватися далі такими позначеннями:

$$\vec{PA}+\vec{PA}\equiv 2\cdot\vec{PA},$$
$$\vec{PA}+\vec{PA}+\vec{PA}\equiv 3\cdot\vec{PA}\ \text{і т. д.} \qquad (4)$$

Природно при цьому умовитися говорити, що вектор $n\cdot\vec{PA}$ утворився в результаті множення числа n на вектор $\vec{PA}$. Цей результат записують і в такому вигляді: $\vec{PA}\cdot n$. Використовуючи сполучний закон додавання і позначення (4), легко довести такі формули, на диво подібні до формул шкільної алгебри:

$$m\vec{PA}+m\vec{PB}=m(\vec{PA}+\vec{PB}), \qquad (5)$$
$$m\vec{PA}+n\vec{PA}=(m+n)\vec{PA}, \qquad (6)$$
$$m(n\cdot\vec{PA})=(mn)\vec{PA}, \qquad (7)$$

де m і n — цілі числа.

Множення вектора на раціональне додатне число $\frac{m}{n}$. Продовжуючи копіювати позначення, прийняті в шкільній алгебрі, умовимося і в нашій «векторній алгебрі» писати

$$\vec{PA}=\frac{m}{n}\cdot\vec{PQ},\ \text{або}\ \vec{PA}=\vec{PQ}\cdot\frac{m}{n}$$

в тому випадку, коли

$$n\cdot\vec{PA}=m\cdot\vec{PQ}.$$

Звідси виходить (це неважко довести), що й у випадку множення вектора на раціональне число справедливі такі формули:

$$\frac{m}{n}(\vec{PA}+\vec{PB})=\frac{m}{n}\vec{PA}+\frac{m}{n}\vec{PB}, \qquad (8)$$
$$\left(\frac{m_1}{n_1}+\frac{m_2}{n_2}\right)\vec{PA}=\frac{m_1}{n_1}\vec{PA}+\frac{m_2}{n_2}\vec{PA}, \qquad (9)$$
$$\frac{m_1}{n_1}\left(\frac{m_2}{n_2}\cdot\vec{PA}\right)=\left(\frac{m_1}{n_1}\cdot\frac{m_2}{n_2}\right)\vec{PA}. \qquad (10)$$

Ці формули містять у собі як окремі випадки вже доведені раніше формули (5), (6), (7).

Як помножити вектор на число —1. Знову використаємо вказівки шкільної алгебри. Пригадаємо, що

$$(-1)\,a + a = 0.$$

Тому природно прийняти, що

$$(-1)\,\vec{PA} + \vec{PA} = \vec{PP},$$

тобто вважати, що вектор $(-1)\cdot\vec{PA}$ є вектор, рівнопротилежний вектору $\vec{PA}$.

Множення вектора на від'ємне раціональне число. Цю операцію будемо виконувати так:

$$\vec{PA}\cdot\left(-\frac{m}{n}\right) = \left(\vec{PA}\cdot\frac{m}{n}\right)\cdot(-1).$$

Інакше кажучи, вважатимемо, що вектор $(-\frac{m}{n})\cdot\vec{PA}$ є вектор, протилежний векторові $\frac{m}{n}\vec{PA}$. Доцільність цього правила проявляється, наприклад, у тому, що з нього, як це можна довести, випливає справедливість формул (7), (8) і (9) і в тому випадку, коли які-небудь з числових множників, що входять до них, мають від'ємні і навіть нульові значення. Доведеться тільки ще прийняти, що

$$0\cdot\vec{PA} = \vec{PP} = 0.$$

Цієї умови ми і будемо далі додержувати.

Віднімання векторів. Цю операцію означаємо як обернену до операції додавання векторів.

Вектор $\vec{PQ}$ називається різницею векторів $\vec{PR}$ і $\vec{PS}$:

$$\vec{PQ} = \vec{PR} - \vec{PS},$$

якщо зменшуваний вектор $\vec{PR}$ дорівнює сумі вектора-різниці $\vec{PQ}$ і вектора-від'ємника $\vec{PS}$, тобто якщо

$$\vec{PR} = \vec{PQ} + \vec{PS}.$$

Дуже важливо з'ясувати і запам'ятати таке правило: знаходження різниці $\vec{PR} - \vec{PS}$ рівносильне знаходженню суми зменшуваного $\vec{PR}$ і вектора, протилежного від'ємникові (рис. 9), тобто

$$\vec{PR} - \vec{PS} = \vec{PR} + (-1)\cdot\vec{PS}. \qquad (11)$$

Справді:

$$[\vec{PR} + (-1)\cdot\vec{PS}] + \vec{PS} = \vec{PR} + [(-1)\cdot\vec{PS} + \vec{PS}] = \vec{PR} + \vec{PP} = \vec{PR}.$$

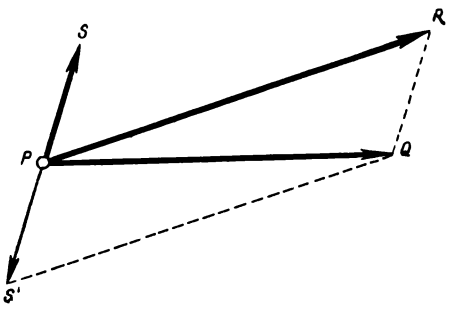


Рис. 9.

Ця заміна віднімання додаванням дає змогу легко вивести важливі (як і в шкільній алгебрі) формули для віднімання суми і різниці:

$$\vec{PA} - (\vec{PB} + \vec{PC}) = \vec{PA} + (-1)\cdot\vec{PB} + (-1)\cdot\vec{PC}, \qquad (12)$$

$$\vec{PA} - (\vec{PB} - \vec{PC}) = \vec{PA} + (-1)\cdot\vec{PB} + \vec{PC}. \qquad (13)$$

Доведемо, наприклад, другу з цих формул:

$$\vec{PA} - (\vec{PB} - \vec{PC}) = \vec{PA} + (-1)\cdot[\vec{PB} + (-1)\cdot\vec{PC}] = \vec{PA} + (-1)\cdot\vec{PB} + (-1)\cdot(-1)\cdot\vec{PC} = \vec{PA} + (-1)\cdot\vec{PB} + \vec{PC}.$$

Ще одне запозичення з шкільної алгебри. На уроках алгебри ставиться іноді запитання: чи можна сказати, що число $-a$ є від'ємне число?

Відповідь ясна: так сказати не можна. Адже

$$-a = (-1)\,a,$$

і тому, якщо a від'ємне число, то $-a$ додатне число; і тільки в тому випадку, коли a додатне число, $-a$ від'ємне. Числа a і $-a$ називають, як відомо, взаємно протилежними.

Наслідуючи і цього разу положення шкільної алгебри, приймемо, що

$$(-1)\,\vec{PA} = -\vec{PA},$$

тобто вважатимемо, що $-\vec{PA}$ є вектор, протилежний векторові $\vec{PA}$[1].

Це позначення дає нам змогу переписати формули (11), (12), (13) у вигляді, звичному

[1] Звернемо увагу на те, що жоден з цих векторів не можна назвати від'ємним, бо ми не встановили (і не будемо встановлювати) поняття «додатний вектор».

для кожного школяра, який знає правила розкриття дужок, перед якими стоїть знак мінус:

$$\vec{PR} - \vec{PS} = \vec{PR} + (-\vec{PS}),$$
$$\vec{PA} - (\vec{PB} + \vec{PC}) = \vec{PA} - \vec{PB} - \vec{PC},$$
$$\vec{PA} - (\vec{PB} - \vec{PC}) = \vec{PA} - \vec{PB} + \vec{PC}.$$

Ще більша схожість з формулами шкільної алгебри виникає, якщо умовитися, заради скорочення, позначати кожен вектор тільки однією буквою, наприклад:

$$\vec{PA} = \bar{a},\ \vec{PB} = \bar{b},\ \vec{PC} = \bar{c} \text{ тощо.}$$

Над цими буквами (a, b, c) поставлені рисочки, щоб нагадати читачеві, що він має справу з вектором, а не з числом.

Прийняті і такі позначення для векторів:

$$\vec{PA} = \boldsymbol{a},\ \vec{PB} = \boldsymbol{b},\ \vec{PC} = \boldsymbol{c},$$

тобто прийнято позначати вектор буквою напівжирного шрифту.

ВЕКТОРНА АЛГЕБРА НА СЛУЖБІ У ГЕОМЕТРІЇ

Геометрія, яка створила нову алгебру, алгебру векторів, сама користується її послугами. Наведемо кілька прикладів розв'язання геометричних задач за допомогою векторної алгебри.

Перший приклад. Нехай задано довільний трикутник $M_1M_2M_3$ (рис. 10). Вибравши деяку точку M_0, побудуємо точку M_0', симетричну точці M_0 відносно точки M_1.

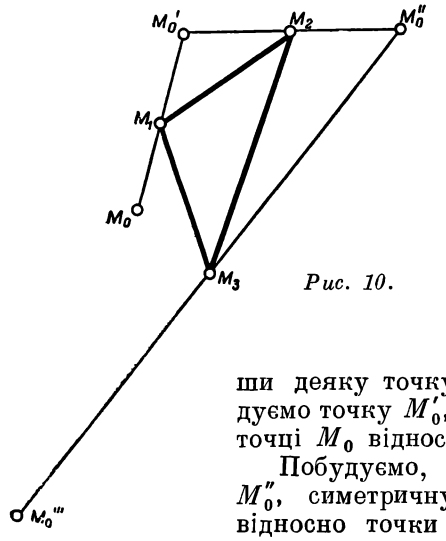


Рис. 10.

Побудуємо, далі, точку M_0'', симетричну точці M_0' відносно точки M_2 і, нарешті, побудуємо точку M_0''', симетричну точці M_0'' відносно точки M_3.

Виконавши ці побудови, побачимо, що на нашому рисунку точка M_0''' не збігається з точкою M_0.

Виникає таке питання: чи можна, вважаючи заданими точки M_1, M_2, M_3, вибрати четверту точку M_0 так, щоб знайдена (в результаті зазначених трьох симетрій) точка M_0''' збіглася з точкою M_0?

Перш ніж розбирати наведене тут розв'язання, спробуйте самостійно розв'язати цю задачу.

Розв'язання. Припустимо, що шукану точку M_0 знайдено. Виберемо яку-небудь довільну точку P і введемо в розгляд вектори $\vec{PM}_1$, $\vec{PM}_2$, $\vec{PM}_3$, а також і вектори $\vec{PM}_0$, $\vec{PM}_0'$, $\vec{PM}_0''$, $\vec{PM}_0'''$, які для скорочення позначимо відповідно $\boldsymbol{r}_1$, $\boldsymbol{r}_2$, $\boldsymbol{r}_3$ і $\boldsymbol{r}_0$, $\boldsymbol{r}_0'$, $\boldsymbol{r}_0''$, $\boldsymbol{r}_0'''$ (зробіть рисунок). За умовою задачі точка M_1 є серединою відрізка M_0M_0'; звідси виходить (за правилом середини для додавання векторів), що

$$\vec{PM}_0 + \vec{PM}_0' = 2\vec{PM}_1,$$

або, у зручнішому запису,

$$\boldsymbol{r}_0 + \boldsymbol{r}_0' = 2\boldsymbol{r}_1$$

(нагадуємо:

$$\vec{PM}_0 \equiv \boldsymbol{r}_0,\ \vec{PM}_1 \equiv \boldsymbol{r}_1 \text{ і } \vec{PM}_0' \equiv \boldsymbol{r}_0').$$

Звідси дістанемо:

$$\boldsymbol{r}_0' \equiv 2\boldsymbol{r}_1 - \boldsymbol{r}_0. \qquad \text{(A)}$$

Врахуємо тепер, що за умовою задачі точка M_0'' симетрична точці M_0' відносно точки M_2. Повторюючи міркування, аналогічні щойно наведеним, дістанемо таку рівність:

$$\boldsymbol{r}_0'' = 2\boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_0'.$$

Замінюючи в цій рівності $\boldsymbol{r}_0'$ його виразом (A), дістанемо:

$$\boldsymbol{r}_0'' = 2\boldsymbol{r}_2 - (2\boldsymbol{r}_1 - \boldsymbol{r}_0),$$

або, розкриваючи дужки,

$$\boldsymbol{r}_0'' = 2\boldsymbol{r}_2 - 2\boldsymbol{r}_1 + \boldsymbol{r}_0. \qquad \text{(B)}$$

Враховуючи, нарешті, що точка M_0''' симетрична точці M_0'' відносно точки M_3, дістанемо аналогічно:

$$\boldsymbol{r}_0''' = 2\boldsymbol{r}_3 - \boldsymbol{r}_0''.$$

Підставляючи замість r_0'' його вираз (В) і розкриваючи дужки (за правилами векторної алгебри), дістанемо:

$$r_0''' = 2r_3 - 2r_2 + 2r_1 - r_0.$$

Тепер вже неважко з'ясувати умови, при яких точка M_0''' збігається з точкою M_0. Це буде, якщо вектор $\vec{PM}_0''' \equiv r_0'''$ збіжиться з вектором $\vec{PM}_0 \equiv r_0$, тобто якщо

$$r_0 = 2r_3 - 2r_2 + 2r_1 - r_0.$$

Після нескладних перетворень дістанемо

$$r_3 + r_1 = r_2 + r_0,$$

або

$$\vec{PM}_3 + \vec{PM}_1 = \vec{PM}_2 + \vec{PM}_0.$$

А ця рівність справедлива тільки в тому випадку, коли середина відрізка M_3M_1 збігається з серединою відрізка M_2M_0, тобто коли точки M_1, M_2, M_3, M_0 утворюють паралелограм, у якого точки M_1 і M_3 — протилежні вершини[1].

Таким чином, точку M_0 треба вибрати (якщо ми хочемо, щоб M_0''' збіглась з M_0) так, щоб вона була четвертою вершиною паралелограма, який має три вершини в точках M_1, M_2, M_3 і для якого M_1 і M_3 — протилежні вершини.

Природно виникає тепер думка застосувати новий, векторний метод розв'язування до аналогічної, але складнішої задачі: за заданими чотирма точками M_1, M_2, M_3, M_4 знайти точку M_0 таку, щоб у результаті послідовного її «відображення»[2] від точок M_1, M_2, M_3, M_4 утворилась точка M_0'''', що збігається з вихідною точкою M_0.

Неважко переконатися (це читач зробить самостійно), що

$$\vec{PM}_0'''' = 2\vec{PM}_4 - 2\vec{PM}_3 + 2\vec{PM}_2 - \\ - 2\vec{PM}_1 + \vec{PM}_0. \qquad (14)$$

З цієї формули виходить, що збіг точки M_0'''' з точкою M_0, тобто збіг векторів $\vec{PM}_0''''$ і $\vec{PM}_0$, можливий тільки в тому випадку, коли

$$\vec{PM}_4 - \vec{PM}_3 + \vec{PM}_2 - \vec{PM}_1 = \vec{0}. \qquad (15)$$

Це значить, що коли точки M_1, M_2, M_3, M_4 не лежать на одній прямій, то вони повинні утворити паралелограм, у якого M_1 і M_3 — протилежні вершини (рис. 11*а*).

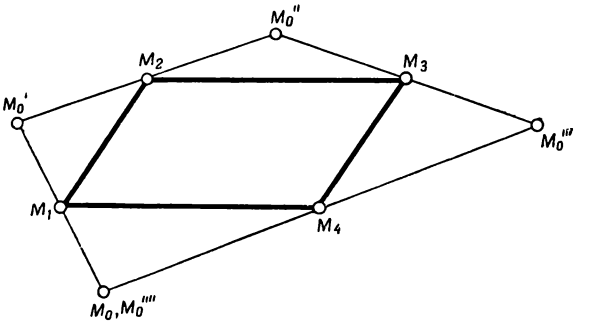


Рис. 11а.

Якщо ж ці точки лежать на одній прямій, то вони повинні бути розміщені так, щоб середина відрізка M_1M_3 збіглася з серединою відрізка M_2M_4 (рис. 11*б*).

Таким чином, якщо задані точки M_1, M_2, M_3, M_4 не мають щойно вказаного розміщення, наша задача не має жодного розв'язку. Якщо ж задані точки M_1, M_2, M_3, M_4 мають вказане розміщення, то внаслідок рівності (15) рівність (14) набирає вигляду $\vec{PM}_0'''' = \vec{PM}_0$, з чого виходить, що в цьому випадку будь-яка точка M_0 переходить у результаті чотирьох послідовних відображень у точку M_0'''', що збігається з точкою M_0.

Звернемо увагу на те, що точка M_0 може бути в цьому випадку вибрана навіть і поза тією площиною, в якій розміщені вихідні чотири точки M_1, M_2, M_3, M_4.

Можливо, тепер у читача виникло бажання з'ясувати, до якого результату приведе розв'язування аналогічної задачі в тому випадку, коли число заданих точок дорівнюватиме п'ятьом, шістьом і т. д. Не підказуючи повного розв'язання, скажемо тільки, що коли, наприклад, задано шість точок (M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6), то існування такої точки M_0, яка після 6 відображень повернеться у вихідне

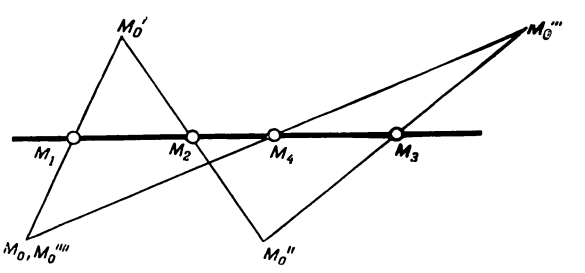


Рис. 11б.

[1] Див задачу 4 на стор. 176.

[2] Тобто побудови точки M_0', симетричної точці M_0 відносно точки M_1, наступної побудови точки M_0'', симетричної точці M_0' відносно точки M_2, і т. д.

положення, можливе тільки в тому випадку, коли точка перетину медіан трикутника $M_1M_3M_5$ збігається з точкою перетину медіан трикутника $M_2M_4M_6$.

Вкажемо тепер кілька задач, з допомогою яких читач може перевірити, чи навчився він застосовувати векторну алгебру до розв'язування геометричних задач.

1. Довільну точку M_0 відобразимо послідовно від вершин трикутника $M_1M_2M_3$. Знайдену точку M_0''' (яка, як показано вище, не збігається з точкою M_0) знову відобразимо послідовно від тих же точок M_1, M_2, M_3. Довести, що в результаті цих шести послідовних відображень утвориться... вихідна точка M_0.

2. Відобразимо довільну точку P_0 послідовно від вершин піраміди M_1, M_2, M_3, M_4. Знайдену точку P_1 також відобразимо послідовно від вершин M_1, M_2, M_3, M_4; дістанемо точку P_2 і відобразимо її послідовно від вершин M_1, M_2, M_3, M_4; дістанемо точку P_3 і т. д.

Довести, що точки P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, ... лежать на одній прямій, і до того ж так, що кожна з них (починаючи з P_1) є серединою відрізка, який визначається попередньою і наступною точками.

Рівність векторів. Умовимося вважати, що вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрично дорівнює вектору $\overrightarrow{A'B'}$, якщо середина відрізка AB' збігається з серединою відрізка BA' (рис. 12*а*, 12*б*, 12*в*).

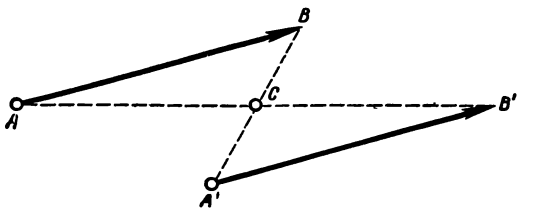


Рис. 12а.

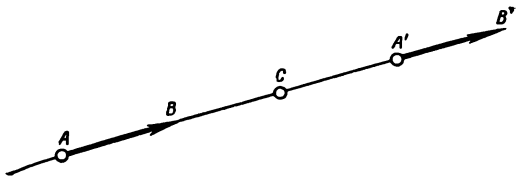


Рис. 12б.

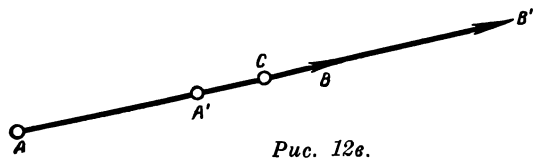


Рис. 12в.

Якщо при цьому точки A, B, A', B' не лежать на одній прямій, то чотирикутник $ABB'A'$ буде, очевидно, паралелограмом (як чотирикутник, діагоналі якого ділять одна одну пополам), в якому точки A і B' є протилежними вершинами. Отже, довжина відрізка AB дорівнює довжині відрізка $A'B'$, пряма AB паралельна прямій $A'B'$.

Наочне уявлення підказує нам, що при цьому вектор $\overrightarrow{AB}$ співнапрямлений з вектором $\overrightarrow{A'B'}$.

Можна довести такі теореми:

1. Якщо вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрично дорівнює вектору $\overrightarrow{A'B'}$, то вектор $\overrightarrow{A'B'}$ геометрично дорівнює вектору $\overrightarrow{AB}$.

2. Вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрично дорівнює вектору $\overrightarrow{AB}$, тобто самому собі.

3. Якщо вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрично дорівнює вектору $\overrightarrow{A'B'}$ і вектор $\overrightarrow{A'B'}$ геометрично дорівнює вектору $\overrightarrow{A''B''}$, то вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрично дорівнює вектору $\overrightarrow{A''B''}$.

Справедливість перших двох теорем відразу виходить з означення геометричної рівності векторів. Для доведення третьої теореми звернемо увагу на те, що коли вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрично дорівнює вектору $\overrightarrow{A'B'}$, то, як легко бачити,

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB'} = \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PA'}, \qquad (16)$$

де P — довільна точка.

Справедливе також обернене твердження: якщо справедлива рівність (16), то вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрично дорівнює вектору $\overrightarrow{A'B'}$ (бо рівність (16) може, очевидно, мати місце тільки в тому випадку, коли середина відрізка AB' збігається з серединою відрізка BA').

Врахуємо тепер, що коли вектор $\overrightarrow{A'B'}$ геометрично дорівнює вектору $\overrightarrow{A''B''}$, то

$$\overrightarrow{PA'} + \overrightarrow{PB''} = \overrightarrow{PB'} + \overrightarrow{PA''}. \qquad (17)$$

Додаючи почленно рівності (16) і (17), дістанемо після скорочень:

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB''} = \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PA''},$$

звідки виходить (внаслідок щойно доведеного оберненого твердження), що вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрично дорівнює вектору $\overrightarrow{A''B''}$ і т. д.

Читач помітив, звичайно, що три теореми про геометричну рівність векторів мають таку ж зовнішню форму, як і відомі з арифметики властивості рівності чисел:

1) Якщо $\alpha = \beta$, то $\beta = \alpha$.

2) $\alpha = \alpha$.

3) Якщо $\alpha = \beta$ і $\beta = \gamma$, то $\alpha = \gamma$.

Внаслідок такої схожості доцільно користуватися записом

$$\vec{AB} = \vec{A'B'}$$

для позначення того, що вектор $\vec{AB}$ геометрично дорівнює вектору $\vec{A'B'}$. Наші три теореми про геометричну рівність векторів наберуть такого вигляду:

1) Якщо $\vec{AB} = \vec{A'B'}$, то $\vec{A'B'} = \vec{AB}$.

2) $\vec{AB} = \vec{AB}$.

3) Якщо $\vec{AB} = \vec{A'B'}$ і $\vec{A'B'} = \vec{A''B''}$, то $\vec{AB} = \vec{A''B''}$.

Прийнято також, заради скорочення, говорити, що вектор $\vec{AB}$ дорівнює вектору $\vec{A'B'}$ в тому випадку, коли вектор $\vec{AB}$ геометрично дорівнює вектору $\vec{A'B'}$. Однак не слід забувати при цьому, що слово «дорівнює» має тут зовсім інший зміст, ніж в арифметиці. Безпечніше було б, звичайно, завжди говорити: геометрично дорівнює.

Щоб підкреслити відмінність у змісті терміну дорівнює, звернемо увагу ось на що.

В арифметиці, якщо число α не дорівнює числу β, то число α або більше від числа β, або менше від нього. У векторній алгебрі, якщо вектор $\vec{AB}$ не дорівнює вектору $\vec{A'B'}$, то звідси ще не випливає, що вектор $\vec{AB}$ або більший від вектора $\vec{A'B'}$, або менший від нього, бо у векторній алгебрі не встановлюється зміст виразу «вектор $\vec{AB}$ більший (менший) від вектора $\vec{A'B'}$»[1].

Як побудувати вектор, що дорівнює заданому вектору? Нехай $\vec{AB}$ — заданий вектор і M — деяка довільна точка. Побудуємо суму векторів $\vec{AB}$ і $\vec{AM}$ (зробіть рисунок!); нехай

$$\vec{AB} + \vec{AM} = \vec{AN}. \qquad (17a)$$

[1] Це не суперечить тому, що вираз «довжина вектора $\vec{AB}$ більша (менша) від довжини вектора $\vec{A'B'}$» має цілком певний зміст.

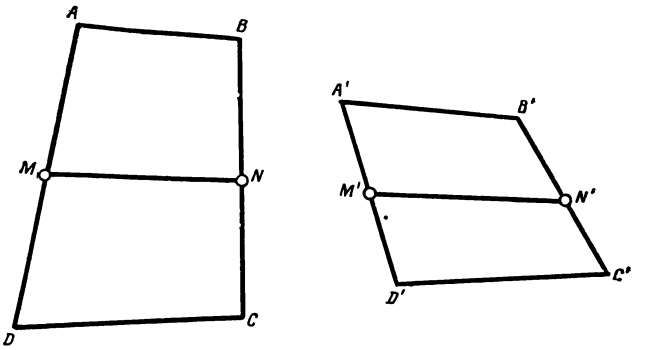


Рис. 13а.

Враховуючи, що середина відрізка AN збігається з серединою відрізка BM, приходимо до висновку, що

$$\vec{AB} = \vec{MN}.$$

Таким чином, шуканий вектор побудовано.

Легко бачити, що ця побудова однозначна, тобто що існує тільки єдиний вектор, який має початок у точці M і геометрично дорівнює вектору $\vec{AB}$: адже коли б існувала точка N', відмінна від точки N і така, що

$$\vec{AB} = \vec{MN'},$$

то була б справедлива рівність

$$\vec{AB} + \vec{AM} = \vec{AN'},$$

що суперечить рівності (17a).

Задача про середню лінію чотирикутника. Середньою лінією трапеції називають, як відомо, відрізок, що сполучає середини її непаралельних сторін. Тому природно назвати середньою лінією довільного чотирикутника $ABCD$ відрізок, який сполучає середини його протилежних сторін (наприклад: AD і BC)[1].

Поставимо тепер таку задачу.

Нехай $ABCD$ (рис. 13a) — довільний чотирикутник (навіть такий, у якого сторони перетинаються (рис. 13$б$), або, скажемо, косий, тобто такий, у якого вершини не лежать в одній площині). Вибравши довільно дві точки A' і D', побудуємо вектори $\vec{A'B'}$ і $\vec{C'D'}$, що дорівнюють відповідно векторам $\vec{AB}$ і $\vec{CD}$.

Проведемо середню лінію MN, яка сполучає сторони AD і BC чотирикутника $ABCD$, і середню лінію $M'N'$ чотирикутника $A'B'C'D'$, що сполучає сторони $A'D'$ і $B'C'$.

[1] Зауважимо, що використану нами на стор. 177 теорему тепер можна сформулювати так: дві середні лінії чотирикутника ділять одна одну пополам.

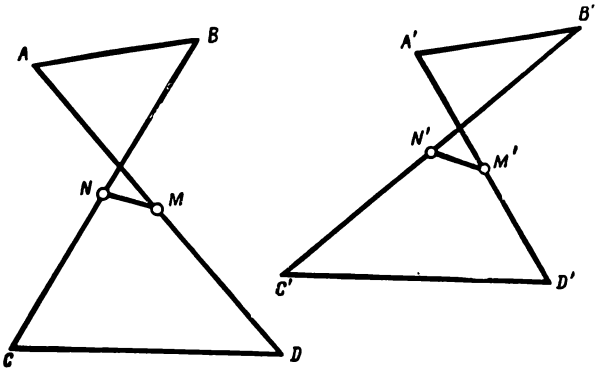


Рис. 13б.

Треба довести, що середні лінії MN і $M'N'$ мають однакову довжину і розміщені на паралельних прямих (або на одній і тій же прямій).

Для доведення досить переконатися, що вектори $\vec{MN}$ і $\vec{M'N'}$ геометрично рівні, тобто що

$$\vec{PM} + \vec{PN'} = \vec{PN} + \vec{PM'}, \qquad (18)$$

де P — довільна точка (тому точка P і не показана на рис. 13*а* і 13*б*).

Візьмемо до уваги, що за умовою задачі

$$\vec{PM} = \frac{1}{2}(\vec{PA} + \vec{PD}); \quad \vec{PN} = \frac{1}{2}(\vec{PB} + \vec{PC});$$

$$\vec{PM'} = \frac{1}{2}(\vec{PA'} + \vec{PD'}); \quad \vec{PN'} = \frac{1}{2}(\vec{PB'} + \vec{PC'})$$

і, отже, рівність (18), яку треба довести, можна після скорочення на множник $\frac{1}{2}$ записати так:

$$\vec{PA} + \vec{PD} + \vec{PB'} + \vec{PC'} = \vec{PB} + \vec{PC} + \vec{PA'} + \vec{PD'}. \qquad (19)$$

Через те що за умовою задачі

$$\vec{AB} = \vec{A'B'} \text{ і } \vec{DC} = \vec{D'C'},$$

то

$$\vec{PA} + \vec{PB'} = \vec{PB} + \vec{PA'},$$
$$\vec{PD} + \vec{PC'} = \vec{PC} + \vec{PD'}.$$

Додаючи ці рівності почленно, дістанемо (19).

Заключні задачі. Про інші положення векторної алгебри і про їх застосування до розв'язування геометричних задач і доведення геометричних теорем можна дізнатися з спеціальних книг. Однак спочатку корисно перевірити, чи добре засвоєно прочитане в статті. З цією метою пропонуємо кілька заключних задач.

1. Точки A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, ... розміщені на прямій лінії так, що кожна з них є серединою відрізка, утвореного попередньою і наступною точками. Довести, що

$$\vec{PA_1} = \vec{PA_0} + (\vec{PA_1} - \vec{PA_0}) \cdot 1,$$
$$\vec{PA_2} = \vec{PA_0} + (\vec{PA_1} - \vec{PA_0}) \cdot 2,$$
$$\vec{PA_3} = \vec{PA_0} + (\vec{PA_1} - \vec{PA_0}) \cdot 3 \text{ і т. д.}$$

2. На відрізку A_0A_1 розміщені точки B_0, B_1, B_2, B_3, ..., B_{n-1}, B_n так, що B_0 збігається з A_0, B_n з A_1, а кожна з решти точок є середина відрізка, утвореного попередньою і наступною точками. Довести, що

$$\vec{PB_1} = \vec{PA_0} + (\vec{PA_1} - \vec{PA_0}) \cdot \frac{1}{n},$$
$$\vec{PB_2} = \vec{PA_0} + (\vec{PA_1} - \vec{PA_0}) \cdot \frac{2}{n},$$
$$\vec{PB_3} = \vec{PA_0} + (\vec{PA_1} - \vec{PA_0}) \cdot \frac{3}{n}$$

і т. д.

3. Як розміщені точки C_1, C_2, C_3, ..., коли відомо, що

$$\vec{PC_1} = \vec{PA_0} + (\vec{PA_1} - \vec{PA_0}) \cdot \frac{1}{n},$$
$$\vec{PC_2} = \vec{PA_0} + (\vec{PA_1} - \vec{PA_0}) \cdot \frac{2}{n},$$
$$\vec{PC_3} = \vec{PA_0} + (\vec{PA_1} - \vec{PA_0}) \cdot \frac{3}{n}$$

і т. д.?

4. Довести: якщо C є точка перетину медіан трикутника $A_1A_2A_3$, то

$$\vec{PC} = \frac{1}{3}(\vec{PA_1} + \vec{PA_2} + \vec{PA_3}),$$

де P — довільна точка (точку C називають центроїдом системи трьох точок A_1, A_2, A_3).

5. Сполучимо кожну з чотирьох точок A_1, A_2, A_3, A_4 з центроїдом системи решти трьох точок. Утворені чотири відрізки перетинаються в одній точці C, для якої

$$\vec{PC} = \frac{1}{4}(\vec{PA_1} + \vec{PA_2} + \vec{PA_3} + \vec{PA_4}),$$

де P — довільна точка. (Точка C називається центроїдом системи чотирьох точок A_1, A_2, A_3, A_4. Вона ділить кожний відрізок у відношенні 1 : 3).

6. Узагальнити попередню задачу для випадку, коли задано 5 точок, 6 точок і т. д.

ЧИСЛА І ДІЇ

Якщо ви спитаєте, чим займається алгебра, то, очевидно, почуєте дуже різні відповіді. Вам можуть сказати, що алгебра займається розв'язуванням рівнянь (і розв'язуванням практичних задач з допомогою рівнянь). І, звичайно, це не буде неправильним! Адже питання розв'язування рівнянь того чи іншого виду займають велике місце в багатьох розділах шкільного курсу алгебри. І все ж така відповідь буде неповною! Дійсно, якщо, скажімо, ви розв'язуєте рівняння

$$\frac{1}{x^2-x}+\frac{2x}{x^2-2x+1}=\frac{9}{x},$$

то для цього треба вміти розкладати на множники (для зведення дробів до спільного знаменника), вміти розкривати дужки, зводити подібні члени тощо. Інакше кажучи, треба вміти правильно виконувати різні дії.

Дії, які потрібні для розв'язання рівняння, виконують над ч и с л а м и. Справа не міняється від того, що до рівняння входять букви, які виражають відомі або невідомі величини: адже букви в алгебрі застосовуються для позначення чисел. А для того щоб виконувати дії над числами, треба знати правила виконання дій, з а к о н и д і й. Вивченню цих правил присвячена значна частина шкільного курсу алгебри. Прикладами можуть бути: розподільний закон

$$a(b+c)=ab+ac,$$

на підставі якого виконується розкриття дужок і винесення множників за дужки; правила дій з степенями:

$$a^b\cdot a^c=a^{b+c},\quad (a^b)^c=a^{bc}$$

і т. д.

Таким чином, рівняння і властивості дій — ось дві основні складові частини шкільного курсу алгебри. Правда, тепер у цьому курсі вивчається ще один розділ — вчення про функції і їх графіки. Однак цей розділ є стороннім для алгебри, і, можливо, в майбутньому він входитиме не до курсу алгебри, а в окремий предмет, присвячений вивченню функцій.

Розмежування кола питань алгебри на два розділи — одного, зв'язаного з теорією многочленів та рівнянь, і другого, зв'язаного з властивостями дій,— має місце не тільки в шкільному курсі алгебри, але також і в курсі, що вивчається у вищих учбових закладах і навіть у працях сучасних учених. Зрозуміло, що обидва ці розділи тісно пов'язані між собою.

ЧИ БАГАТО ПОТРІБНО ЧИСЕЛ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ РІВНЯНЬ

Найпростіші рівняння — це рівняння першого степеня з одним невідомим. Найбільш звичні для нас числа — це цілі додатні числа, з якими ми зустрічаємося ще в ранньому дитинстві при перелічуванні предметів. Якщо ми розглядатимемо тільки такі рівняння першого степеня з одним невідомим, коефіцієнтами яких є цілі додатні числа, то зможемо з їх допомогою розв'язувати дуже багато задач. Наприклад, першу-ліпшу задачу з арифметики із задачника III або IV класу, вміщену до розділу про дроби, можна розв'язати, звичайно, «за запитаннями», як це й роблять учні зазначених класів. Але можна також скласти для такої задачі рівняння і знайти відповідь, розв'язавши це рівняння. При розв'язуванні такого рівняння треба вміти поводитися тільки з цілими додатними числами; і відповідь буде цілим додатним числом. (Адже інших чисел учні цих класів ще не знають, тому задачі підібрано лише такі, в яких відповідь є числом цілим і додатним!).

Чи можемо ми з цього зробити висновок, що взагалі жодних інших чисел, крім цілих додатних, і знати не треба, щоб уміти розв'язувати перші-ліпші рівняння? Звичайно, ні! Візьмемо, наприклад, рівняння

$$ax+b=c, \tag{1}$$

в якому коефіцієнти a, b і c — цілі додатні числа (до такого виду можна звести будь-яке рівняння першого степеня з цілими додатними коефіцієнтами). Для його розв'язання треба спочатку перенести число b в праву частину рівності, тобто переписати рівняння у вигляді $ax=c-b$, а потім поділити різницю $c-b$ на a; в результаті дістанемо

$$x=\frac{c-b}{a}.$$

Якщо ми захочемо навчитися розв'язувати б у д ь - я к е рівняння першого степеня з цілими додатними коефіцієнтами, то, по-перше, нам треба навчитися обчислювати різницю $c-b$. Це обов'язково приводить до введення від'ємних (ці-

лих) чисел, бо при $b>c$ доводиться віднімати від меншого числа більше. По-друге, ми повинні вміти ділити різницю $c-b$ на a. Це приводить до введення раціональних чисел, тобто чисел не тільки цілих, а й дробових (включаючи також і від'ємні дроби).

Отже, для розв'язування б у д ь - я к и х рівнянь першого степеня з цілими додатними коефіцієнтами треба мати «в запасі» (щоб можна було записати відповідь) всі раціональні числа. Це і стало однією з спонукальних причин введення дробових і від'ємних чисел у математику. Маючи ж у своєму розпорядженні всі раціональні числа, ми можемо розв'язувати рівняння першого степеня не тільки з цілими додатними, а й з будь-якими раціональними коефіцієнтами (за винятком, звичайно, випадків, коли коефіцієнт a у рівнянні (1) дорівнює нулеві — адже в цьому випадку невідоме x зовсім не входить у розглядуване «рівняння»). Інакше кажучи, для розв'язування рівнянь першого степеня нічого іншого, крім раціональних чисел, і знати не треба. Неважко зрозуміти, чим пояснюються ці зручні (щодо розв'язування рівнянь першого степеня) властивості раціональних чисел. Адже для розв'язування рівнянь першого степеня (або систем таких рівнянь) треба лише вміти виконувати чотири арифметичні дії: додавання, віднімання, множення і ділення (крім, звичайно, ділення на нуль), а в множині всіх раціональних чисел ці дії завжди здійсненні.

Множину чисел, в якій здійсненні всі чотири арифметичні дії (крім ділення на нуль), математики називають ч и с л о в и м п о л е м. Отже, множина всіх раціональних чисел є числовим полем. Навпаки, множина всіх цілих додатних чисел не є числовим полем: у ній не завжди здійсненні віднімання і ділення (наприклад, дії 2—5 і 3 : 7 не можна виконати, знаючи лише цілі додатні числа). Для того щоб віднімання завжди було здійсненне, треба приєднати до цілих додатних чисел ще число «нуль» і всі цілі від'ємні числа. Тоді ми дістанемо множину всіх цілих чисел. Але і вона не є числовим полем: хоч у ній завжди здійсненні додавання, віднімання і множення, але не завжди здійсненне ділення (наприклад, дію 2 : 7 неможливо виконати, знаючи лише цілі числа). А приєднуючи до цілих чисел всі дробові числа, ми дістаємо множину [1] всіх раціональних чисел, яка вже є числовим полем.

[1] Докладніше про те, що таке множина, ви дізнаєтеся з статті «Поняття множини».

ПОТРІБНІ НОВІ ЧИСЛА

Не треба думати, що з побудовою поля раціональних чисел вже створена така величезна кількість чисел, при якій кожному алгебраїчному рівнянню «дістанеться» хоч би один корінь. Адже, крім рівнянь першого степеня, є ще квадратні рівняння і рівняння вищих степенів. Наприклад, рівняння

$$x^2-3=0 \qquad (2)$$

не має розв'язків у полі раціональних чисел: немає такого раціонального числа, квадрат якого дорівнює трьом. Якщо ми хочемо, щоб це рівняння мало розв'язок, то ми повинні п р и є д н а т и до поля раціональних чисел таке число, квадрат якого дорівнює трьом. Воно позначається через $\sqrt{3}$. Але, звичайно, приєднання до поля раціональних чисел тільки одного нового числа $\sqrt{3}$ є не дуже вдалою операцією, бо після цього ми вже не дістаємо числового поля. Якщо ми хочемо, щоб у нас знову вийшло числове поле, то ми повинні разом з числом $\sqrt{3}$ приєднати до поля раціональних чисел і числа $2\sqrt{3}$, $\frac{1}{3}\sqrt{3}$, $-\frac{1}{3}\sqrt{3}$ тощо, тобто всі числа виду $b\sqrt{3}$, де b — будь-яке раціональне число (адже в полі повинно бути здійсненне множення). Крім того, ми повинні приєднати і числа $1-\sqrt{3}$, $5+\frac{1}{3}\sqrt{3}$, $\frac{7}{11}+\frac{1}{5}\sqrt{3}$ тощо, тобто всі числа виду $a+b\sqrt{3}$, *де* a і b — будь-які раціональні числа (адже в полі повинні бути здійсненні додавання і віднімання). Цікаво, що більше вже нічого приєднувати і не потрібно: *всі числа виду* $a+b\sqrt{3}$, *де* a *і* b *— будь-які раціональні числа, утворюють числове поле*, тобто в множині всіх таких чисел можна виконувати чотири арифметичні дії. Наприклад, ділення зводиться до звільнення від ірраціональності в знаменнику:

$$\frac{\frac{3}{2}+\sqrt{3}}{1-\frac{1}{2}\sqrt{3}}=\frac{\left(\frac{3}{2}+\sqrt{3}\right)\left(1+\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)}{\left(1-\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)\left(1+\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)}=$$

$$=\left[\left(\frac{3}{2}+\sqrt{3}\right)\left(1+\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)\right]:\frac{1}{4}=12+7\sqrt{3}.$$

Поле чисел виду $a+b\sqrt{3}$ утворилося з поля раціональних чисел приєднанням до нього ряду нових чисел. Тому воно називається р о з ш и р е н н я м поля раціональних чисел. Це

поле має багато цікавих властивостей. Якщо, наприклад, розглядати тільки «цілі» числа виду $a + b\sqrt{3}$, тобто числа, у яких коефіцієнти a і b є цілими, то можна (як і в множині звичайних цілих чисел) шукати розклад різних чисел на множники. Цікаво, що серед таких чисел (тобто чисел $a + b\sqrt{3}$ з цілими коефіцієнтами a і b) одиниця допускає розкладання на множники! Ось приклади таких розкладів:

$$1 = (2 - \sqrt{3})(2 + \sqrt{3}),$$
$$1 = (7 - 4\sqrt{3})(7 + 4\sqrt{3}).$$

Тепер стає зрозумілим, що запитання: «Чи має рівняння $x^2 - 3 = 0$ хоч би один корінь?» без вказівки, в якому полі ми хочемо шукати його корені, не має смислу. Якщо ми хочемо шукати корені в полі раціональних чисел, то відповідь буде негативна: не існує раціонального числа, квадрат якого дорівнював би 3. А в полі чисел $a + b\sqrt{3}$ відповідь буде позитивна; рівняння $x^2 - 3 = 0$ має корені $x_1 = \sqrt{3}$, $x_2 = -\sqrt{3}$. Так само, щоб відповісти на запитання: «Чи можна розкласти даний многочлен на множники?», треба знати, в якому полі дозволяється брати коефіцієнти многочленів. Наприклад, у полі раціональних чисел многочлен $x^2 - 3$ на множники не розкладається, тобто є нерозкладним, або, як ще кажуть, незвідним. А в полі чисел виду $a + b\sqrt{3}$ цей же многочлен на множники розкладається:

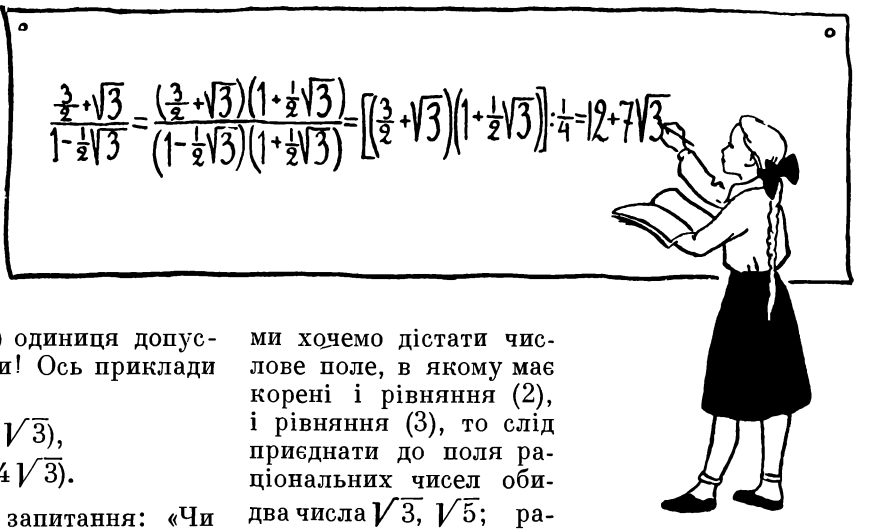
$$x^2 - 3 = (x - \sqrt{3})(x + \sqrt{3}).$$

ЗБІЛЬШИТИ ВДВОЄ ОБ'ЄМ КУБА

Для знаходження поля чисел виду $a + b\sqrt{3}$ ми виходили з рівняння (2). Розглянемо тепер інше квадратне рівняння:

$$x^2 - 5 = 0. \qquad (3)$$

Можна довести, що не тільки в полі раціональних чисел, але й у полі чисел виду $a + b\sqrt{3}$ це рівняння не має коренів. Щоб дістати поле, в якому рівняння (3) має корені, треба приєднати до поля раціональних чисел число $\sqrt{5}$, а разом з ним і всі числа виду $a + b\sqrt{5}$, де a і b — будь-які раціональні числа. Якщо ж ми хочемо дістати числове поле, в якому має корені і рівняння (2), і рівняння (3), то слід приєднати до поля раціональних чисел обидва числа $\sqrt{3}$, $\sqrt{5}$; разом з ними доведеться приєднати і всі числа виду $a + b\sqrt{3} + c\sqrt{5} + d\sqrt{15}$, де a, b, c, d — будь-які раціональні числа. Нехай читач самостійно перевірить, що всі числа такого виду дійсно утворюють числове поле (тобто що в множині всіх таких чисел здійсненні чотири арифметичних дії).



Значне розширення «запасу» чисел ми дістанемо, розглядаючи різноманітні числа, що утворюються з раціональних чисел за допомогою чотирьох арифметичних дій та добування квадратного кореня. Ці числа будемо називати квадратичними ірраціональностями. Серед них є, наприклад, такі числа:

$$1 + \sqrt{3},\ 2 + \frac{2}{3}\sqrt{5} - \frac{1}{11}\sqrt{17},\ \sqrt{1 + \sqrt{2}},$$
$$\sqrt[4]{3} = \sqrt{\sqrt{3}},\ \sqrt[4]{1 + \sqrt[8]{\sqrt{3} + \sqrt{11}}} \text{ тощо.}$$

Всі квадратичні ірраціональності, разом узяті, утворюють числове поле. Далі, якщо з будь-якого додатного числа, яке є квадратичною ірраціональністю, добути квадратний корінь, то ми знову дістанемо квадратичну ірраціональність. З цього виходить, що коли ми візьмемо будь-яке квадратне рівняння, у якого коефіцієнтами є квадратичні ірраціональності, а дискримінант додатний (це потрібно для того, щоб корені даного квадратного рівняння були дійсними числами), то корені цього рівняння також будуть квадратичними ірраціональностями. Адже при розв'язуванні квадратних рівнянь треба лише вміти виконувати арифметичні дії та добувати квадратні корені,

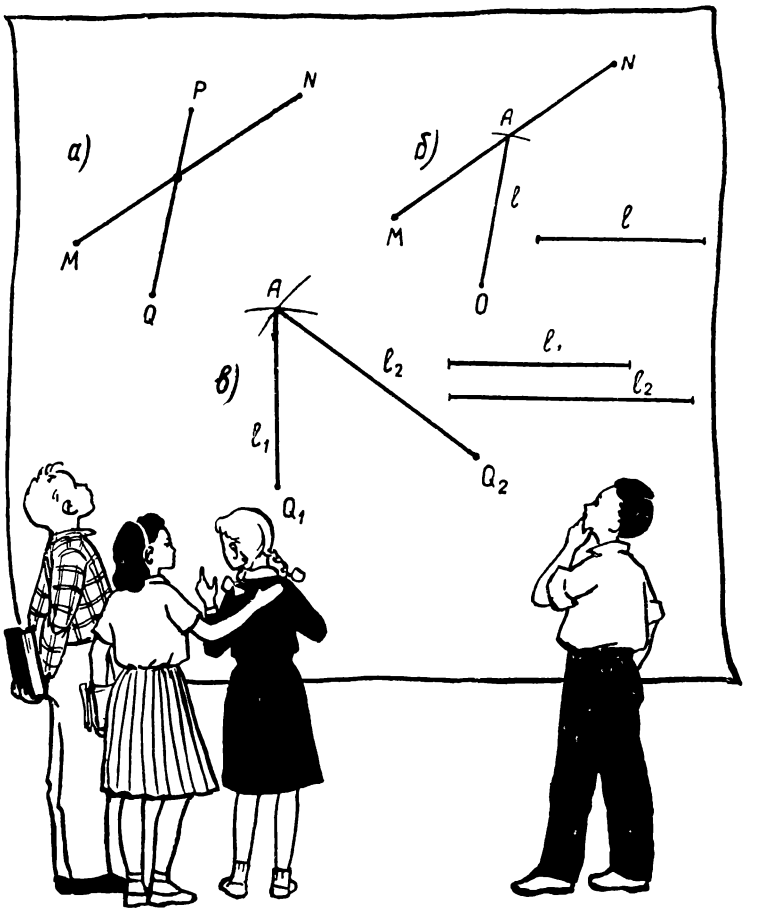


Рис. 1.

а це все в полі квадратичних ірраціональностей робити можна. Таким чином, у полі квадратичних ірраціональностей можна не тільки виконувати арифметичні дії (а значить, розв'язувати рівняння першого степеня), а й розв'язувати квадратні рівняння (з додатним дискримінантом).

Поле квадратичних ірраціональностей тісно пов'язане з геометричними побудовами за допомогою циркуля і лінійки. Справді, припустимо, що нам дано деякий відрізок a і потрібно, виходячи з цього відрізка, зробити циркулем та лінійкою деяку геометричну побудову. Наприклад: побудувати правильний десятикутник з стороною a або побудувати рівносторонній трикутник, у якого медіана дорівнює a, і т. д. Коли ми розв'язуємо циркулем і лінійкою задачу на побудову, то ми повторюємо (в певній послідовності) тільки т р и операції:

1) Уже побудовані деякі чотири точки M, N, P, Q; знайти точку перетину прямих MN і PQ. Ця операція виконується з допомогою лінійки (рис. 1, *а*).

2) Уже побудовані три точки M, N, O і відрізок l; знайти на прямій MN таку точку A, що довжина відрізка AO дорівнює l. Ця операція виконується з допомогою лінійки (проводиться пряма MN) і циркуля (робиться засічка з центром O, див. рис. 1, *б*).

3) Уже побудовані дві точки Q_1, Q_2 і два відрізки l_1, l_2; побудувати точку A, відстані якої від точок Q_1 і Q_2 відповідно дорівнюють l_1 і l_2. Ця операція виконується з допомогою циркуля (рис. 1, *в*).

Проводячи ці операції, ми можемо будувати нові і нові точки, нові і нові відрізки, поки не побудуємо фігури, яка нам потрібна. Нескладні розрахунки (з допомогою теореми Піфагора, формули Герона та інших теорем шкільного курсу геометрії) показують, що всі нові відрізки, які виникають при виконанні будь-якої з цих трьох операцій, мають довжини, що виражаються через довжини попередніх відрізків з допомогою чотирьох арифметичних дій та добування квадратних коренів. Тому, якщо довжину на початку заданого відрізка a прийняти за одиницю, то в с і відрізки, які ми можемо побудувати з допомогою циркуля та лінійки, будуть такі, що довжини їх є к в а д р а т и ч н и м и і р р а ц і о н а л ь н о с т я м и. І навпаки, будь-який відрізок, довжина якого виражається квадратичною ірраціональністю, можна побудувати з допомогою циркуля і лінійки. Тому з допомогою обчислень можна заздалегідь дізнатися, чи вдасться, чи не вдасться розв'язати циркулем та лінійкою дану задачу. Якщо розрахунки покажуть, що довжини всіх відрізків, які нам треба побудувати для розв'язання задачі, є квадратичними ірраціональностями, то задачу можна розв'язати з допомогою циркуля і лінійки. Але якщо розрахунки покажуть, що задача зводиться до побудови відрізка, довжина якого н е є квадратичною ірраціональністю, то таку задачу розв'язати циркулем і лінійкою н е м о ж л и в о.

Якщо, наприклад, ми хочемо побудувати правильний п'ятикутник з стороною 1, то нам треба для цього знати довжину діагоналі п'я-

тикутника (тоді всі вершини можна буде знайти з допомогою засічок). Розрахунки показують, що в такому п'ятикутнику діагональ має довжину $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$. Через те що це число є квадратичною ірраціональністю, то побудова правильного п'ятикутника з допомогою циркуля і лінійки можлива. Великий німецький математик Гаусс (1777—1855) довів, що коли p — просте число, то правильний p-кутник з даною стороною a можна побудувати циркулем і лінійкою лише в тому разі, коли число p можна записати у вигляді

$$p = 2^{2^n} + 1.$$

Наприклад, $17 = 2^{2^2} + 1$, тому правильний сімнадцятикутник можна побудувати циркулем і лінійкою. Побудова ж, наприклад, правильного одинадцятикутника неможлива з допомогою циркуля і лінійки.

У давні часи математики витратили багато сил на розв'язання такої задачі: дано куб з ребром a; побудувати такий куб, об'єм якого в д в о є більший від об'єму даного куба. Підраховуємо, який відрізок треба побудувати для розв'язання цієї задачі. Візьмемо довжину відрізка a за одиницю, а довжину ребра шуканого куба позначимо через x. Тоді об'єм даного куба дорівнюватиме одиниці, а об'єм шуканого куба дорівнюватиме x^3. За умовою задачі повинно бути

$$x^3 = 2,$$

звідки $x = \sqrt[3]{2}$. Число $\sqrt[3]{2}$ не є квадратичною ірраціональністю, і тому *задачу про подвоєння куба з допомогою циркуля і лінійки розв'язати не можна.*

АЛГЕБРАЇЧНІ І НЕАЛГЕБРАЇЧНІ (ТРАНСЦЕНДЕНТНІ) ЧИСЛА

Досі ми цікавилися розв'язанням рівнянь першого степеня і квадратних рівнянь. Що ж буде, коли ми братимемо рівняння будь-яких степенів? Якщо приєднати до поля раціональних чисел всі дійсні числа, які є коренями різноманітних алгебраїчних рівнянь (будь-якого степеня) з цілими коефіцієнтами, то ми дістанемо нове розширення поля раціональних чисел. Числа, які входять до цього поля, називаються а л г е б р а ї ч н и м и ч и с л а м и. Зокрема, всі квадратичні ірраціональності (і взагалі всі дійсні числа, які виражаються з допомогою радикалів, наприклад $\sqrt[3]{2}$) є алгебраїчними числами.

Однак, навіть узявши поле алгебраїчних чисел, ми ще не дістаємо в с і х дійсних чисел, тобто всіх чисел, які ми зображаємо у вигляді точок на числовій осі. Навіть більше того, серед дійсних чисел набагато б і л ь ш е неалгебраїчних чисел, ніж алгебраїчних (хоч і тих і других безліч). Образно кажучи, якщо ми «пофарбуємо» числову пряму білою фарбою, а потім чорною фарбою нанесемо точки, які відповідають алгебраїчним числам, то на прямій ще залишаться «просвіти» (не пофарбовані в чорний колір точки), причому ці просвіти можна буде знайти скрізь, на першому-ліпшому відрізочку, хоч би яким маленьким він був.

Числа, які не є алгебраїчними, називаються також т р а н с ц е н д е н т н и м и. Німецький математик Ліндеман довів у 1882 р., що число π трансцендентне, тобто не є коренем ніякого алгебраїчного рівняння з цілими коефіцієнтами. Радянський математик О. Й. Гельфонд довів, що коли a і b — додатні алгебраїчні числа, то число $\log_a b$ або раціональне, або ж, в противному разі, обов'язково трансцендентне. Наприклад, числа $\log_2 3$, $\log_{10} 5$, $\log_{10} 27$ тощо трансцендентні. Взагалі десяткові логарифми всіх раціональних чисел, крім чисел $1, 10, 100, 1000, \ldots, \frac{1}{10}, \frac{1}{100}, \frac{1}{1000}, \ldots$, трансцендентні.

Множина в с і х дійсних чисел також є числовим полем — адже дійсні числа (які зображаються точками на числовій осі) можна додавати і віднімати, множити і ділити.

ПОВНИЙ ДОСТАТОК ЧИСЕЛ

Навіть усіх дійсних чисел не досить для того, щоб можна було розв'язати будь-яке алгебраїчне рівняння з цілими коефіцієнтами. Наприклад, рівняння

$$x^2 + 1 = 0 \qquad (4)$$

не має коренів у полі дійсних чисел: адже це рівняння можна записати у вигляді $x^2 = -1$, а квадрат будь-якого дійсного числа (додатного чи від'ємного) є число н е в і д'є м н е.

Для того щоб розв'язати рівняння (4), треба приєднати до поля дійсних чисел нове («уявне») число $\sqrt{-1}$. Разом з цим новим числом $\sqrt{-1}$ треба, звичайно, приєднати і всі числа виду $a + b\sqrt{-1}$, де a і b — будь-які дійсні числа (якщо $b = 0$, то число $a + 0 \cdot \sqrt{-1}$ вважається таким, що збігається з дійсним числом a). Числа виду $a + b\sqrt{-1}$ називаються к о м п-

лексними. Їх можна додавати, віднімати і множити за звичайними правилами (як многочлени). Ділення здійснюється за допомогою множення чисельника і знаменника на спряжене число:

$$\frac{2+\sqrt{-1}}{3-\sqrt{-1}}=\frac{(2+\sqrt{-1})(3+\sqrt{-1})}{(3-\sqrt{-1})(3+\sqrt{-1})}=$$
$$=\frac{5+5\sqrt{-1}}{3^2-(\sqrt{-1})^2}=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sqrt{-1}.$$

Таким чином, з комплексними числами можна виконувати всі арифметичні дії, тобто *комплексні числа утворюють поле.* Поле комплексних чисел є розширенням поля дійсних чисел, причому в цьому розширеному полі рівняння (4) вже має корені:

$$x_1=\sqrt{-1},\quad x_2=-\sqrt{-1}.$$

Визначною властивістю поля комплексних чисел є те, що воно алгебраїчно замкнене. Це означає, що *будь-яке алгебраїчне рівняння (довільного степеня) з дійсними або комплексними коефіцієнтами має корені в полі комплексних чисел.* Це—знаменита «основна теорема алгебри», перше (але неповне) доведення якої дав французький математик д'Аламбер (в середині XVIII ст.) і яку вперше з усією строгістю довів Гаусс у 1799 р. З цієї теореми випливає, що будь-який многочлен відносно x з комплексними (зокрема з дійсними) коефіцієнтами можна розкласти на множники першого степеня (з комплексними коефіцієнтами). Наприклад:

$$x^2+1=(x+\sqrt{-1})(x-\sqrt{-1}).$$

Той факт, що поле дійсних чисел не є алгебраїчно замкненим, а стає таким лише після приєднання комплексних чисел, показує, що введення в математику комплексних чисел не було випадковим, не було марною вигадкою, а стало закономірним продуктом розвитку теорії алгебраїчних рівнянь. Тепер комплексні числа широко застосовуються не тільки при розв'язуванні рівнянь, а й в ряді інших розділів математики, а також в електротехніці, аеродинаміці і т. д.

ЗАМІСТЬ ЧОТИРЬОХ ДІЙ — ТРИ

Арифметичні дії в алгебрі виконуються не тільки над числами, а й над буквеними виразами, наприклад над многочленами. Будемо розглядати тільки многочлени від однієї букви x з дійсними коефіцієнтами, наприклад x^2-5, x^3+2x^2-x, $\frac{1}{4}x^4+\sqrt{2}$ і т. д.[1] Такі многочлени можна додавати, віднімати і множити, причому в результаті знову діставатимемо многочлени. Ділення ж многочлена на многочлен не завжди можливе без остачі. Наприклад, многочлен x^2+3 не ділиться без остачі на $x+1$ (тобто немає такого многочлена, при множенні якого на $x+1$ ми дістали б многочлен x^2+3). Таким чином, в множині всіх многочленів завжди здійсненні три дії: додавання, віднімання і множення, а четверта дія (ділення) не завжди здійсненна. Зауважимо, що закони дій, які виконуються над многочленами, такі самі, як і закони дій з числами. Наприклад, розподільний закон

$$(a+b)c=ac+bc$$

справедливий і для чисел, і для многочленів. Те саме можна сказати про комутативні закони:

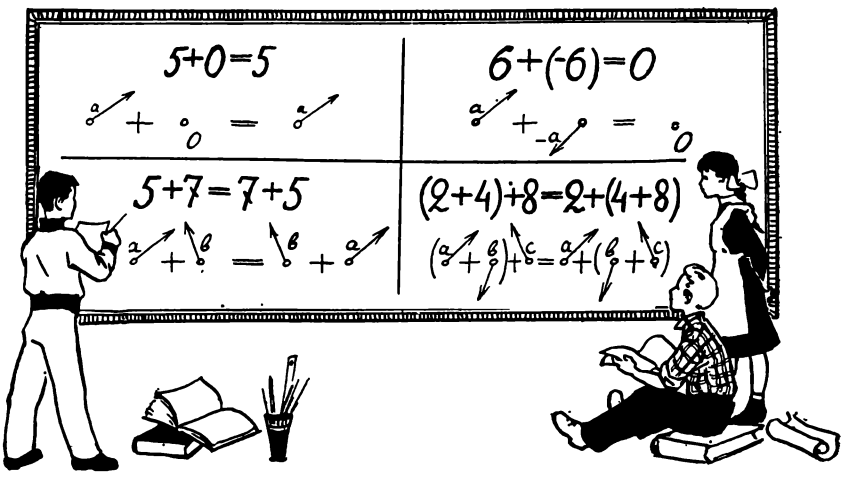
$$ab=ba,\quad a+b=b+a,$$

про правила розкриття дужок і т. д. Множина деяких математичних об'єктів (наприклад чисел або многочленів), в якій здійсненні три дії: додавання, віднімання і множення, що підпорядковуються звичайним законам (розподільному, комутативному та ін.), називається кільцем. Таким чином, множина всіх многочленів відносно букви x являє собою кільце («кільце многочленів»).

Зрозуміло, всяке числове поле є також і кільцем: адже в ньому додавання, віднімання і множення завжди здійсненні (і, крім того, здійсненне ділення). Однак кільце не завжди є полем, бо у кільці ділення може бути не завжди здійсненним. Прикладом кільця, яке не є полем (тобто кільця, в якому не завжди здійсненне ділення), саме і є кільце многочленів. Другим прикладом кільця (що також не є полем) може бути множина всіх цілих чисел: в ній здійсненні додавання, віднімання і множення, але ділення здійсненне не завжди. Всі парні числа також утворюють кільце, бо сума, різниця і добуток парних чисел знову є парними числами. У протилежність цьому множина всіх непарних чисел кільця не утворює, бо в ній нездійсненні додавання і віднімання (адже сума двох непарних чисел уже не є непарним числом).

[1] Кожне число також слід розглядати як многочлен (многочлен нульового степеня, тобто многочлен, що зовсім не має букви x).

НАД ЧИМ МОЖНА ВИКОНУВАТИ ДІЇ



Виконуючи додавання, віднімання і множення многочленів, ми вперше помічаємо, що алгебраїчні дії можна виконувати не тільки над числами, а й над деякими іншими математичними об'єктами (многочленами). У наш час думка про те, що алгебраїчні дії можна виконувати не тільки над числами, а й над іншими об'єктами, не є такою вже неймовірною навіть для учнів. Наприклад, в статті «Геометрична алгебра» ви можете прочитати про додавання і віднімання в е к т о р і в; в статті «Незвичайна арифметика» — про додавання, віднімання і множення л и ш к і в; в статті «Поняття про геометричні відображення» — про додавання перетворень.

Що ж є спільного між цілком різними на перший погляд операціями, які ми називаємо одним і тим же терміном «додавання» (додавання чисел, додавання векторів, додавання перетворень)? Звичайно ми не зважаємо на ту обставину, що в цих операцій спільна назва; адже назву можна дати яку-небудь іншу; наприклад, с у м у двох векторів можна було б назвати їх р і в н о д і й н о ю (ця назва застосовується в механіці у випадку двох сил, прикладених до однієї точки). *Спільним в усіх цих операцій є те, що за своїми властивостями вони нагадують звичайне додавання чисел.*

Пригадаймо, наприклад, додавання векторів, докладно розглянуте на стор. 175—179 цього тома. Як ми знаємо, воно асоціативне (сполучне), тобто для будь-яких трьох векторів a, b, c справджується співвідношення

$$a + (b + c) = (a + b) + c.$$

Завдяки цій властивості додавання векторів стає спорідненим додаванню чисел. Далі, серед векторів, так само як і серед чисел, існує нуль (нульовий вектор), який має ту властивість, що для будь-якого вектора a справедливе співвідношення

$$a + 0 = a.$$

Як і у випадку чисел, для кожного вектора a існує протилежний вектор, який позначається $-a$ і має ту властивість, що

$$a + (-a) = 0.$$

Це дає змогу означити віднімання векторів, а саме: різницю $a - b$ означити як вектор $a + (-b)$. Всі властивості рівностей, відомі для чисел, зберігаються також і для векторів. Наприклад, можна переносити члени з однієї частини рівності в другу, змінюючи знаки, що стоять перед цими членами, на протилежні. Звідси виходить, що для будь-яких двох векторів a і b рівняння

$$x + b = a$$

має один розв'язок, а саме:

$$x = a - b.$$

Додамо до всього сказаного, що додавання векторів комутативне (переставне):

$$a + b = b + a,$$

і нам стане зрозуміло, що додавання векторів і додавання чисел дійсно мають багато спільного. Так само можна було б вказати багато властивостей, спільних для додавання чисел і додавання геометричних перетворень, для додавання чисел і додавання лишків. Є ще дуже багато прикладів таких математичних об'єктів, «додавання» яких має аналогічні властивості.

ПОНЯТТЯ ГРУПИ

Усе сказане підводить нас до важливого математичного поняття — поняття г р у п и. Деякі математичні об'єкти (скажімо, вектори) утворюють групу, якщо для цих об'єктів означені дві взаємно обернені дії (які називаються звичайно «додаванням» і «відніманням»), властивості яких нагадують нам властивості додавання і віднімання чисел. Точніше означення групи буде сформульовано нижче.

Яка ж користь від того, що схожі (правилами дії) об'єкти ми називаємо одним і тим же терміном «група»? Справа в тому, що коли ми доведемо яку-небудь теорему про групу взагалі (тобто теорему, справедливу для будь-якої групи), то ця теорема буде застосовна до будь-якого з розглянутих вище випадків (числа, лишки, геометричні перетворення, вектори) і до ряду інших випадків, яких ми не розглядали. Наприклад, правила додавання і віднімання многочленів, правило знаків при розкритті дужок і т. д. можна довести в і д р а з у для всіх цих випадків, не подаючи окремих доведень для випадку векторів, для випадку геометричних перетворень, для випадку лишків тощо. Інакше кажучи, кожна загальна теорема про групи дає можливість відразу дістати і деяку властивість чисел, і властивість векторів, і властивість геометричних перетворень тощо. До деякої міри це можна проілюструвати на прикладі розв'язування квадратних рівнянь: знання загальної формули розв'язання дозволяє розв'язувати ряд квадратних рівнянь з числовими коефіцієнтами. Так і тут: розвиток однієї загальної математичної теорії — т е о р і ї г р у п — дозволяє діставати важливі результати в ряді питань математики: в геометрії (вектори, геометричні перетворення тощо), в теорії чисел, в алгебрі і т. д., а також у деяких розділах сучасної фізики.

Сформулюємо тепер точне означення поняття групи. Насамперед група являє собою м н о ж и н у (див. статтю «Поняття множини») яких-небудь елементів, наприклад, множину всіх чисел або множину всіх векторів, всіх геометричних перетворень і т. д. Далі, для елементів, з яких ця множина складається (скажімо, для векторів), означена деяка операція (тобто деяка дія), що називається «додаванням» і відносить до кожних двох елементів a і b розглядуваної множини третій елемент тієї ж множини — їх «суму» $a + b$. Якщо ця операція має певні властивості (які нагадують нам додавання чисел), то розглядувана множина елементів, у якій означена ця операція, і називається групою.

Які ж властивості повинна мати операція додавання для того, щоб ми могли твердити, що розглядувана множина є групою? Насамперед слід сказати, що додавання н е п е р е д б а ч а є т ь с я комутативним: не треба, щоб для будь-яких двох елементів a і b було справедливе співвідношення

$$a + b = b + a,$$

так що суми $a + b$ і $b + a$ можуть не збігатися одна з одною. Що ж вимагається від операції додавання? Вона повинна мати такі три властивості:

1°. В розглядуваній множині є нульовий елемент, який позначається символом 0, додавання якого до будь-якого елемента не змінює цього елемента[1]:

$$a + 0 = a, \quad 0 + a = a.$$

2°. Для будь-якого елемента a є протилежний елемент $-a$, який у сумі з елементом a дає нульовий елемент:

$$a + (-a) = 0, \quad (-a) + a = 0.$$

3°. Додавання асоціативне, тобто для будь-яких трьох елементів a, b, c справедливе співвідношення

$$(a + b) + c = a + (b + c).$$

Отже, *групою називається така множина, в якій означена операція, що має перелічені властивості* 1°—3°. Якщо, крім того, ця операція має властивість комутативності, тобто для будь-яких елементів a і b справедливе співвідношення $a + b = b + a$, то розглядувана група називається к о м у т а т и в н о ю. Для того щоб задати групу, не досить вказати всі елементи, з яких вона складається; треба вказати ще ту операцію, розгляд якої перетворює цю множину в групу. Адже якщо в одній і тій же множині по різному ввести операцію додавання, то дістанемо р і з н і групи, хоч і такі, що складаються з одних і тих же елементів.

ПРИКЛАДИ ГРУП

Найпростіші приклади груп ми вже наводили. Якщо розглянемо множину всіх дійсних чисел і звичайну операцію додавання, то дістанемо групу (бо всі властивості 1°—3° для чисел, як відомо, справджуються). Ця група — її називають числовою прямою, або числовим континуумом, — очевидно, комутативна.

Множина всіх векторів на площині або векторів у просторі із звичайною операцією додавання (за правилом паралелограма) є групою, причому групою також комутативною. Перша з цих двох груп (вектори на площині) називається двовимірною векторною групою, а друга

[1] Якщо додавання комутативне, то $a + 0$ і $0 + a$ — один і той же елемент, так що замість двох рівностей $a + 0 = a$, $0 + a = a$ можна написати лише одну (будь-яку). Якщо ж додавання не має властивості комутативності, то слід вказувати обидві ці рівності.

(вектори в просторі) — тривимірною векторною групою.

Група може містити і скінченне число елементів. Прикладом є група лишків за модулем m, що складається з остач від ділення на m із звичайним їх додаванням (див. статтю «Незвичайна арифметика»). Така група (очевидно, комутативна) містить m елементів. Наприклад, група лишків за модулем 3 складається з трьох елементів: 0, 1, 2, а група лишків за модулем 10 — з десяти елементів: 0, 1, ..., 9.

Нарешті, всі паралельні перенесення і всі повороти площини також утворюють групу — вона називається групою рухів площини. Нульовим елементом цієї групи є тотожне перетворення площини, тобто таке «перетворення», в результаті якого всі точки площини залишаються на місці (це перетворення можна назвати «поворотом на нульовий кут» або «паралельним перенесенням на нульовий відрізок»). Протилежним елементом для деякого повороту є поворот у протилежному напрямі на той же кут; протилежним елементом для деякого паралельного перенесення є перенесення в протилежному напрямі на той же відрізок.

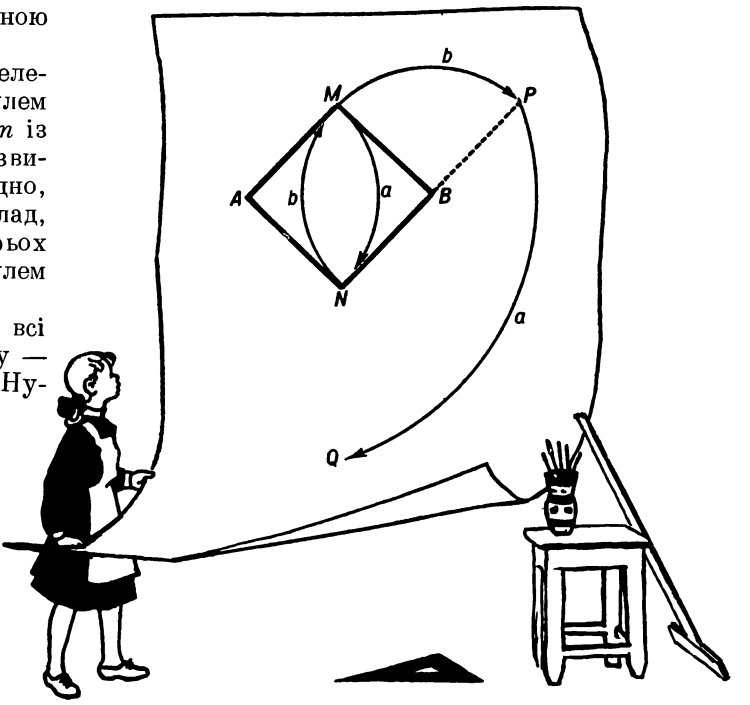


Рис. 2.

Варт зауважити, що група рухів площини некомутативна. Справді, розглянемо в площині деякий квадрат $AMBN$ (рис. 2) і позначимо через a поворот площини на 90° за стрілкою годинника навколо точки A, а через b — поворот площини на 90° за стрілкою годинника навколо точки B. Покажемо, що сума рухів a і b залежить від того, в якому порядку беремо доданки, тобто що $a + b \neq b + a$. Рух a переводить точку M у положення N; здійснивши потім рух b, ми переведемо точку N у положення M. Таким чином, рух $a + b$ (спочатку a, потім b) переводить точку M знову в точку M. Виконаємо тепер рух $b + a$ (спочатку b, потім a). Точка, в яку переводиться M рухом b, позначена на рис. 2 буквою P. Рух a переводить точку P в точку Q. Таким чином, рух $a + b$ переводить точку M знову в точку M, а рух $b + a$ переводить точку M в іншу точку — Q, і тому $a + b$ і $b + a$ — різні рухи.

Ще один простий приклад групи ми дістанемо, розглядаючи всі цілі числа (додатні, від'ємні і нуль) із звичайною операцією додавання. Зауважимо, що числа 0, 1, 2, 3,... (цілі невід'ємні числа), розглядувані із звичайною операцією додавання, групи не утворюють: ця множина не має властивості 2°, в ній немає протилежних елементів для додатних чисел.

Простий, але на перший погляд дещо дивний приклад групи ми дістанемо, якщо розглянемо множину всіх додатних дійсних чисел, а як «додавання» візьмемо звичайне множення чисел — адже справа не в назві операції (додавання чи множення), аби лише були виконані властивості 1°—3°, які визначають групу. А властивості ці тут дійсно виконані. Роль «нульового елемента» відіграє число 1:

$$a \cdot 1 = a, \quad 1 \cdot a = a.$$

(Ми позначаємо операцію точкою, як звичайне множення, хоч називати її будемо «додаванням»). Протилежним елементом для додатного числа a є число $\frac{1}{a}$:

$$a \cdot \frac{1}{a} = 1; \quad \frac{1}{a} \cdot a = 1.$$

Крім того, це «додавання» (тобто звичайне множення чисел), як відомо, асоціативне:

$$(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c).$$

Таким чином, ми дійсно маємо групу. Цей приклад показує велику схожість між операціями додавання і множення. Історично тривалий час будь-яку операцію в групі з властивостями

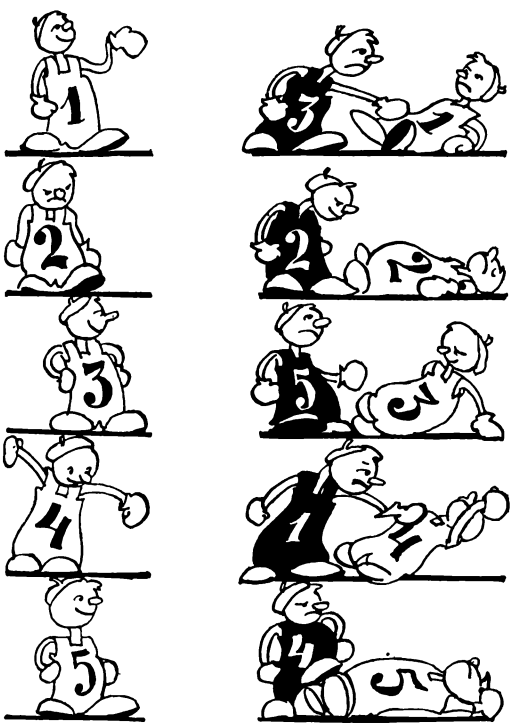
1°—3° називали «множенням», але останнім часом для групової операції більш поширеною стала назва «додавання». Це ще раз показує, що справа тут не в назві, а в тих властивостях, які має розглядувана операція.

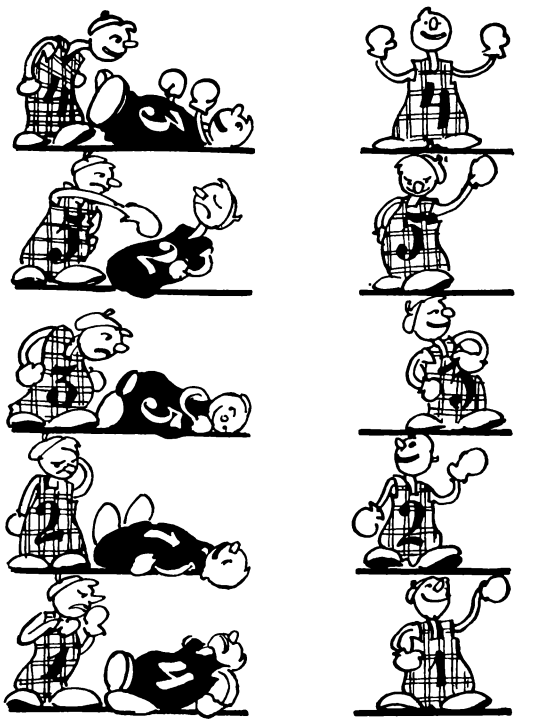
ГРУПИ ПІДСТАНОВОК

Поняття групи виникло у XVIII ст. при дослідженні рівнянь вищих степенів у зв'язку з розглядом так званих підстановок, важливу роль яких встановив французький математик Лагранж. Нехай є n яких-небудь предметів $A_1, A_2, \ldots, A_n$ (такими «предметами» були в початкових дослідженнях корені рівнянь n-го степеня). П і д с т а н о в к о ю називається заміна предметів $A_1, A_2, \ldots, A_n$ цими ж предметами, але в іншому порядку. Наприклад, якщо предмет A_1 замінюється предметом A_3, A_2 замінюється на A_1, а A_3 замінюється предметом A_2, то ми маємо підстановку предметів A_1, A_2, A_3. Ця підстановка записується у вигляді

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}.$$

У верхньому рядку вказуються номери спочатку взятих предметів, а в нижньому — номери





тих предметів, якими вони замінюються. Аналогічний запис застосовується і для позначення підстановок будь-якого числа предметів. Наприклад, запис

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

означає, що предмети A_1, A_2, A_3, A_4 замінені відповідно предметами A_4, A_3, A_1, A_2.

Виконання підстановок однієї за одною називають м н о ж е н н я м підстановок. Якщо, наприклад, перша підстановка переводить предмет A_1 у предмет A_3, а друга підстановка предмет A_3 заміняє предметом A_4, то добуток цих двох підстановок відразу замінятиме предмет A_1 предметом A_4. Звичайно, перемножувати можна тільки такі підстановки, які виконуються над одними й тими ж предметами. Ось приклад множення підстановок:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 2 & 5 & 1 & 4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 5 & 4 & 1 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 4 & 5 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Всі підстановки одних і тих же предметів, наприклад предметів A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, утворюють групу відносно вказаної операції мно-

женням[1] підстановок. Одиницею є підстановка, що залишає всі предмети на місці:

$$\begin{pmatrix}1&2&3&4&5\\1&2&3&4&5\end{pmatrix}.$$

Обернена підстановка означається так само просто: якщо деяка підстановка переводить предмет A_1 в предмет A_3, то обернена підстановка, навпаки, заміняє предмет A_3 предметом A_1. Ось, наприклад, дві підстановки, з яких одна є оберненою для другої:

$$\begin{pmatrix}1&2&3&4&5\\3&2&5&1&4\end{pmatrix},\ \begin{pmatrix}1&2&3&4&5\\4&2&1&5&3\end{pmatrix}.$$

Отже, підстановки деякого числа предметів (наприклад, предметів A_1, A_2, ..., A_n) утворюють групу.

* * *

Виникнення теорії груп зв'язано насамперед з ім'ям Галуа — видатного французького математика, який загинув[2] у 1832 р., коли

йому був 21 рік. Незважаючи на те, що життя його було таке коротке, Галуа залишив дуже глибокий слід у науці. Основні дослідження Галуа належать до сучасної алгебри, один із розділів якої має зараз назву теорії Галуа. У своїх творах Галуа заклав основи теорії алгебраїчних рівнянь і теорії розширення полів. Він розглядав різні групи і поля, в першу чергу групи підстановок. Галуа дістав з допомогою груп ряд визначних результатів в галузі розв'язування рівнянь вищих степенів.

Роботи Галуа довгий час не діставали визнання, хоч деякі з них були надруковані ще за його життя. Лише через 14 років після смерті Галуа французький математик Ліувілль розібрав і опублікував всі його роботи. В 70-х роках XIX ст. ідеї і методи Галуа набули великого поширення. Приблизно до цього часу і належить швидкий розвиток загальної теорії груп (Жордан, Бернсайд та інші математики), яка не тільки мала істотний вплив на всю математику, а й знайшла згодом важливі застосування в деяких розділах фізики (наприклад у квантовій механіці, в кристалографії) та в інших науках. Поняття групи застосовується майже в усіх розділах математики. В розвиток теорії груп великий вклад внесли російські і радянські вчені.

[1] Розглянуту операцію в групі підстановок можна було б назвати і додаванням, але назва «множення», що раніше виникла, так і залишилась для цієї операції. Але справа, звичайно, не в назві. Зверніть увагу на спробу художника жартівливо зобразити смисл цієї операції у вигляді змагання малесеньких боксерів.

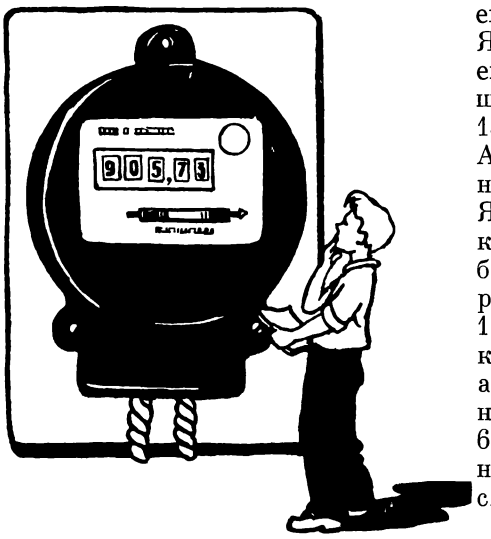
[2] Галуа активно виступав проти королівського режиму, брав участь у товаристві «Друзів народу», двічі сидів у тюрмі за свою політичну діяльність. Його було вбито на дуелі, яку, очевидно, спеціально підстроїли роялісти.

НЕЗВИЧАЙНА АРИФМЕТИКА

АРИФМЕТИКА ОСТАЧ

Який лічильний механізм вміє лічити тільки до 1000? Наш домашній електролічильник. Витрачену електричну енергію він лічить у кіловат-годинах (*квт-г*). Погляньте на рисунок. Лічильник показує число 905,73. Це значить, що, починаючи з того моменту, коли лічильник показував число 0, витрачено 905,73 *квт-г* електроенергії. Мине ще деякий час, і лічильник покаже 999,99 *квт-г*. А 1000 *квт-г* наш домашній електролічильник показати не може; замість 1000 він знову покаже 0 — така його конструкція.

Припустимо, що зараз у віконечках лічильника з'явилося число 016,09, а місяць тому на цьому лічильнику було число 880,12. Відкинемо десяті і соті в кожному числі і поставимо запитання: скільки електроенергії витрачено за місяць?



Знаючи особливість конструкції електролічильника, ми, звичайно, лічимо так: 1016—880=136 *(квт-г)*. Але самий лічильник не вміє лічити далі тисячі; коли б і ми не вміли, то в нас вийшла б дещо незвична арифметика:

$$016 - 880 = 136, \text{ або}$$
$$880 + 136 = 16.$$

Можна сказати і так: у дійсності лічильник виконує додавання (наприклад, до 880 додає 136), але показує нам у своїх віконечках лише о с т а н н і т р и цифри суми (десяті і соті ми до розрахунку не беремо), навіть якщо сума більша від тисячі. Це означає, що, додаючи до числа, показаного лічильником у минулому місяці, число, що виражає витрату електроенергії за останній місяць, лічильник показує не саму суму, а о с т а ч у від ділення цієї суми на 1000. Знаючи, що кілька років тому, в момент встановлення лічильника, на ньому був показ 000, а зараз він показує 016, ви не зможете встановити, скільки електроенергії було витрачено за весь цей час. Ви тільки зможете сказати, що було витрачено 16 *квт-г* і ще якесь ц і л е ч и с л о т и с я ч кіловат-годин, але скільки саме тисяч — невідомо.

Лічильник може і множити. Уявімо собі, що хтось засвічує світло і гасить його щодня в одні й ті самі години, так що кожного місяця витрачається одна й та сама кількість електроенергії, наприклад 136 *квт-г*. Яка буде витрата електроенергії за рік? Очевидно, що відповідь буде така: 136 *квт-г* $\times 12 = 1632$ *квт-г*. Але лічильник відповість нам на це запитання по-іншому. Якщо, наприклад, на початку року показ лічильника був 016, то наприкінці року, після витрачання ще 1632 *квт-г* електроенергії, показ лічильника буде не 1648, а 648, так що показ лічильника збільшився лише на 632. З «точки зору» лічильника множення виконується так:

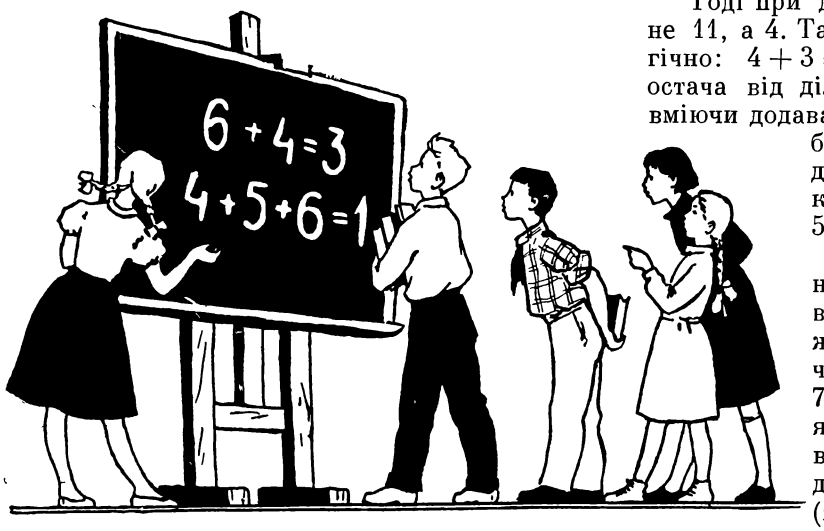
$$136 \cdot 12 = 632.$$

І тут лічильник дає нам не самий добуток (тобто 1632), а лише остачу від ділення його на 1000, тобто число 632.

Отже, арифметика лічильника — це арифметика остач від ділення на 1000. В цій арифметиці тільки 999 цілих чисел і нуль; сума і добуток тут ніколи не перевищують 999, а при відніманні ніколи не буде від'ємних чисел.

Зручніше ознайомитися з такою арифметикою, беручи остачу від ділення на менше число, ніж 1000. Нехай, наприклад, деякий механізм лічить так: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 і далі знову 0 (замість числа 7), 1 (замість числа 8), 2 (замість числа 9) і т. д., тобто замість кожного числа механізм показує остачу від ділення цього числа на 7.

Тоді при додаванні чисел 6 і 5 дістанемо не 11, а 4. Так і запишемо: $6 + 5 = 4$. Аналогічно: $4 + 3 = 0$. Далі, $5 \cdot 6 = 2$, бо 2 — це і є остача від ділення числа 30 на 7. Нарешті, вміючи додавати і множити, ми можемо спробувати виконувати і обернені дії — віднімання і ділення. Наприклад, $1 - 5 = 3$ (бо $3 + 5 = 1$); $5 : 3 = 4$ (бо $3 \cdot 4 = 5$).



У такій арифметиці, яку можна назвати «арифметикою остач від ділення на 7», є скінченна множина чисел — всього 7. Ці сім чисел (тобто остачі від ділення на 7, над якими дії виконуються так, як це було пояснено вище) називаються л и ш к а м и з а м о д у л е м 7. Покази лічильника (якщо відкинути в них десяті

і соті частини) також є лишками (тобто остачами), але вже за модулем 1000. Звичайно, можна розглядати лишки і за іншими модулями; наприклад, покази хвилинної стрілки годинника є лишками за модулем 60 (адже через кожні 60 хвилин хвилинна стрілка починає відлічувати хвилини заново: одна, дві,...).

Щоб не змішувати звичайну рівність чисел з рівністю остач від ділення двох чисел на якенебудь число, останню, як правило, записують так: $a \equiv b \pmod m$ (читають: a конгруентне з b за модулем m, тобто a і b при діленні на m дають одні й ті ж остачі). В наших прикладах слід було б записати так:

$$6 + 5 \equiv 4 \pmod 7 \text{ або } 5 \cdot 6 \equiv 2 \pmod 7.$$

У нашій статті ми цього правила додержувати не будемо.

Повернемося знову до лишків за модулем 7. Як ми бачили, додавати і множити лишки дуже легко: треба їх додати або перемножити, як звичайні числа, після чого взяти не самий результат, а його остачу від ділення на 7. Підраховуючи різноманітні суми і добутки лишків, можна скласти «таблицю додавання» і «таблицю множення». Ось ці таблиці для лишків за модулем 7.

Таблиця додавання

+	0	1	2	3	4	5	6
0	0	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	0
2	2	3	4	5	6	0	1
3	3	4	5	6	0	1	2
4	4	5	6	0	1	2	3
5	5	6	0	1	2	3	4
6	6	0	1	2	3	4	5

Таблиця множення

×	0	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4	5	6
2	0	2	4	6	1	3	5
3	0	3	6	2	5	1	4
4	0	4	1	5	2	6	3
5	0	5	3	1	6	4	2
6	0	6	5	4	3	2	1

У цих таблицях верхній рядок чисел і лівий стовпчик (вони відокремлені лінійками) служать для вибору доданків або співмножників, а решта таблиці — для знаходження суми або добутку взятих чисел.

Наприклад, щоб знайти добуток $4 \cdot 5$, ми беремо в таблиці множення рядок, в якому стоїть співмножник 4, і стовпчик, в якому стоїть співмножник 5. На перетині взятих рядка і стовпчика знаходимо шуканий добуток:

$$4 \cdot 5 = 6.$$

Зазначені таблиці можна використати також для віднімання і ділення лишків. Нехай, наприклад, ми хочемо знайти частку $5 : 2$. Інакше кажучи, ми хочемо знайти такий лишок x, що $2 \cdot x = 5$. Ясно, що нам треба для цього взяти той рядок таблиці множення, який відповідає множеному 2, і знайти, де в цьому рядку стоїть добуток 5:

×							
2	0	2	4	6	1	3	5

Після цього залишається подивитися на верхній рядок, щоб побачити той множник x, для якого добуток $2 \cdot x$ дорівнює 5. Цим множником буде число 6, тобто $2 \cdot 6 = 5$; звідси $5 : 2 = 6$. Зверніть увагу, що у виписаному рядку таблиці множення (що відповідає множеному 2) зустрічаються по одному разу всі лишки (від 0 до 6). Це означає, що *будь-який* лишок можна поділити на 2. Ту саму властивість має і будь-який інший рядок таблиці множення, крім, звичайно, рядка, який відповідає множеному 0. Звідси висновок: в *арифметиці лишків за модулем 7 ділення завжди здійсненне, за винятком випадку, коли дільник дорівнює нулеві*. Інакше кажучи, в цій арифметиці не існує дробових чисел.

Так буде і для лишків за модулем 5, і для лишків за модулем 13, і взагалі для лишків за *простим* модулем. Якщо ж модуль, за яким беруться лишки, не є простим числом, то ділення не завжди можливе. Наприклад, в арифметиці лишків за модулем 10 ділення $1 : 5$ нездійсненне. Адже при множенні на 5 дістаємо або 0, або 5. Таким чином, для будь-якого лишку x за модулем 10 має місце або рівність $5 \cdot x = 0$, або рівність $5 \cdot x = 5$, і тому рівняння $5 \cdot x = 1$ нерозв'язне (тобто не має коренів).

ЧИ МОЖНА РОЗВ'ЯЗАТИ ВСІ КВАДРАТНІ РІВНЯННЯ

Будемо розглядати тільки такі квадратні рівняння $ax^2 + bx + c = 0$, в яких коефіцієнти a, b, c є найрізноманітнішими лишками за модулем 5, причому $a \neq 0$, бо при $a = 0$ рівняння перестане бути квадратним.

При цих обмеженнях, накладених на коефіцієнти a, b і c, не так вже й багато буде всіх можливих квадратних рівнянь. Якщо їх написати в зошиті, то вони в с і вмістяться на одній сторінці; отже, в цьому випадку кожен сміливо може заявити, що він береться розв'язати всі такі квадратні рівняння.

Розв'язуючи будь-яке таке рівняння, треба пам'ятати, що коренями його можуть бути також тільки лишками за модулем 5, тобто 0, 1, 2, 3, 4. Які з них задовольняють яке рівняння, неважко визначити звичайною пробою (підставляючи їх по черзі замість x в дане рівняння).

Можна зробити і так: доповнити ліву частину рівняння до повного квадрата. Якщо, наприклад, дано рівняння $x^2 + x + 3 = 0$, то, додавши по 1, дістанемо $x^2 + x + 4 = 1$, або $x^2 + 2 \cdot 3x + 3^2 = 1$, або, нарешті, $(x + 3)^2 = 1$.

Розглянемо таблицю квадратів (за модулем 5):

$$0^2 = 0;\quad 1^2 = 1;\quad 2^2 = 4;\quad 3^2 = 4;\quad 4^2 = 1.$$

Очевидно тепер, що права частина рівняння $(x + 3)^2 = 1$ являє собою або 1^2, або 4^2. Звідси знаходимо два розв'язки: $x_1 + 3 = 1$; $x_2 + 3 = 4$, або $x_1 = 3$; $x_2 = 1$. (Звернемо увагу, що $1 = 6$, $4 = 3^2$ за модулем 5).

Але, як показує таблиця квадратів, серед лишків за модулем 5 немає такого, квадрат якого дорівнював би двом або трьом. Отже, деяка частина квадратних рівнянь із числа всіх можливих зовсім не матиме коренів. Нерозв'язне, наприклад, таке рівняння: $x^2 = 2$. Виникає думка: приєднати до множини лишків за модулем 5 стільки нових «лишків», скільки потрібно, щоб усі розглядувані квадратні рівняння мали розв'язок.

Справді, досить, наприклад, приєднати «ірраціональний лишок» $\sqrt{2}$, квадрат якого за означенням дорівнює двом, і відразу ж рівняння $x^2 = 2$ стає розв'язним; його розв'язок: $x = \sqrt{2}$.

Слід пам'ятати, проте, що, штучно розширюючи множину лишків, ми повинні забезпечити також і виконання умов нашої арифметики, тобто щоб у результаті арифметичних дій над числами розширеної множини «лишків» виходили тільки числа тієї ж множини.

А якщо так, то до п'яти лишків 0, 1, 2, 3, 4 доведеться приєднати не один «ірраціональний лишок» $\sqrt{2}$, а д в а д ц я т ь таких:

$\sqrt{2}$	$1+\sqrt{2}$	$2+\sqrt{2}$	$3+\sqrt{2}$	$4+\sqrt{2}$
$2\sqrt{2}$	$1+2\sqrt{2}$	$2+2\sqrt{2}$	$3+2\sqrt{2}$	$4+2\sqrt{2}$
$3\sqrt{2}$	$1+3\sqrt{2}$	$2+3\sqrt{2}$	$3+3\sqrt{2}$	$4+3\sqrt{2}$
$4\sqrt{2}$	$1+4\sqrt{2}$	$2+4\sqrt{2}$	$3+4\sqrt{2}$	$4+4\sqrt{2}$

Разом з лишками 0, 1, 2, 3, 4 виходить множина, яка складається з 25 елементів. Переконайтеся в тому, що, не виходячи за рамки цієї множини, можна виконувати всі арифметичні дії.

Цікаво, що в розглянутій множині, яка складається з 25 елементів, кожен елемент, крім нуля, є тим чи іншим цілим степенем елемента $2 + \sqrt{2}$. Так, $(2 + \sqrt{2})^2 = 1 + 4\sqrt{2}$;

$(2 + \sqrt{2})^3 = (1 + 4\sqrt{2}) \cdot (2 + \sqrt{2}) = 4\sqrt{2}$;

$(2 + \sqrt{2})^4 = 4\sqrt{2} \cdot (2 + \sqrt{2}) = 3 + 3\sqrt{2}$;

$(2 + \sqrt{2})^5 = (3 + 3\sqrt{2}) \cdot (2 + \sqrt{2}) = 2 + 4\sqrt{2}$;

$(2 + \sqrt{2})^6 = (2 + 4\sqrt{2}) \cdot (2 + \sqrt{2}) = 2$;

. . . . . .

$$(2 + \sqrt{2})^{24} = 1.$$

АРИФМЕТИКА ЛИШКІВ ДОПОМАГАЄ ЗВИЧАЙНІЙ АРИФМЕТИЦІ

Нехай треба знайти остачу від ділення на 7 числа $13 \cdot 10^4 + 702^3 \cdot 61$.

Здавалося б, для цього треба спочатку виконати зазначені дії, а потім знайдений результат поділити на 7. Але, як легко зрозуміти, ми дістанемо шукану остачу, виконуючи зазначені дії не над самими числами 13, 10, 702 і 61, а над їх л и ш к а м и за модулем 7, звичайно, за правилами арифметики лишків, тобто використовуючи наведені вище таблиці додавання і множення.

Числа	13	10	702	61
Лишки за модулем 7	6	3	2	5

Але $10^4 = 3^4 = 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 4$; $702^3 = 2 \cdot 2 \cdot 2 = 1$. Далі, $6 \cdot 4 + 1 \cdot 5 = 1$. Шукану остачу знайдено. Взагалі очевидно, що коли деяке

число дістаємо з допомогою яких завгодно комбінацій додавання, віднімання і множення кількох чисел, то лишок цього числа за модулем m дорівнює такій же арифметичній комбінації лишків даних чисел.

Тепер ми можемо по-новому глянути на деякі відомі нам ознаки подільності і вивести нові.

ОЗНАКИ ПОДІЛЬНОСТІ

На 9. Щоб дізнатися, чи ділиться деяке число на 9, розглядають с у м у ц и ф р цього числа: якщо сума цифр ділиться на 9, то і саме число ділиться на 9, а якщо сума цифр не ділиться, то і саме число не ділиться. Наприклад, число 157 608 ділиться на 9 (сума його цифр дорівнює 27), а число 123 576 не ділиться. На чому грунтується ця добре відома о з н а к а п о д і л ь н о с т і?

Ми знаємо, що в десятковій системі числення число 157 608 являє собою скорочений запис суми

$$1 \cdot 10^5 + 5 \cdot 10^4 + 7 \cdot 10^3 + 6 \cdot 10^2 + \\ + 0 \cdot 10 + 8 \cdot 1. \qquad (1)$$

Число 10 дає при діленні на 9 остачу 1; степені числа 10 (10^2, 10^3, ...) при діленні на 9 також дають в остачі 1. Замінимо в сумі (1) кожне з чисел 10^5, 10^4, 10^3, 10^2, 10 його остачею від ділення на 9, тобто 1. Тоді ми дістанемо суму

$$1 + 5 + 7 + 6 + 0 + 8,$$

тобто суму цифр розглядуваного числа. Остача від ділення на 9 цієї суми повинна бути така ж, як і при діленні на 9 числа 157 608. З цього і випливає сформульована вище ознака подільності на 9.

На 11. Для відшукання ознаки подільності на 11 ми повинні знайти остачі від ділення на 11 чисел 10, 10^2, 10^3, 10^4 і т. д. Найпростіше це зробити, вважаючи 10 не числом, а л и ш к о м за модулем 11. Через те що остача від ділення на 11 числа 10 дорівнює 10, то за модулем 11

$$10^1 = 10,$$
$$10^2 = 10 \cdot 10 = 1,$$
$$10^3 = 10 \cdot 10^2 = 10 \cdot 1 = 10,$$
$$10^4 = 10 \cdot 10^3 = 10 \cdot 10 = 1,$$
$$10^5 = 10 \cdot 10^4 = 10 \cdot 1 = 10$$

і т. д.

Ми бачимо, що лишки п а р н и х степенів дорівнюють одиниці, а н е п а р н и х — десятьом. Виходить, що цифри, які стоять на парних місцях (рахуючи справа), треба множити на одиниці, а цифри, що стоять на непарних місцях, — на 10. Замість множника 10 зручніше взяти —1 (бо $10 = 11 - 1$). Це дає нам таку ознаку: якщо р і з н и ц я між сумою цифр, які стоять на непарних місцях (рахуючи справа), і сумою цифр, що стоять на парних місцях, ділиться на 11, то і взяте число ділиться на 11, а якщо ця різниця не ділиться на 11, то і саме число не ділиться на 11.

На 7. Спробуємо тепер знайти ознаку подільності на 7. Візьмемо те саме число 157 608. Як і у випадку подільності на 9, ми можемо в сумі (1) замінити кожне з чисел 10^5, 10^4, 10^3, 10^2, 10 його остачею від ділення на 7. Тоді замість числа 157 608 ми дістанемо набагато менше число, що має ту саму остачу від ділення на 7, і легко зможемо визначити, чи ділиться на 7 спочатку взяте число. Адже діючи з лишками за модулем 7, ми знову дістанемо лишок, тобто дістанемо число, не більше шести. Тому ясно, що лічити за допомогою лишків л е г ш е, тим більше, що у нас є таблиця множення лишків! Остача від ділення на 7 числа 10 дорівнює трьом; звідси

лишок числа 10 дорівнює $3^1 = 3$,
лишок числа 10^2 дорівнює $3^2 = 3 \cdot 3 = 2$,
лишок числа 10^3 дорівнює $3^3 = 3 \cdot 3^2 = 6$,
лишок числа 10^4 дорівнює $3^4 = 3 \cdot 3^3 = 4$,
лишок числа 10^5 дорівнює $3^5 = 3 \cdot 3^4 = 5$.

Замінивши числа 10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5 відповідно числами 3, 2, 6, 4, 5, ми дістанемо замість суми (1) число

$$1 \cdot 5 + 5 \cdot 4 + 7 \cdot 6 + 6 \cdot 2 + 0 \cdot 3 + 8 \cdot 1 = 87.$$

Остачу від ділення цього числа на 7 легко знайти «в думці»: вона дорівнює 3. Така ж і остача від ділення числа 157 608 на 7.

Ми дістасмо таку ознаку подільності на 7: треба першу, другу, третю,... цифри числа, рахуючи їх з к і н ц я (тобто справа), помножити відповідно на числа 1, 3, 2, 6, 4, 5, ... і всі знайдені добутки додати. Якщо ця сума ділиться на 7, то і саме число ділиться на 7, а якщо сума не ділиться, то і саме число не ділиться. Однак ще простіше множити цифри (беручи їх одну за одною справа) не на числа 1, 3, 2, 6, 4, 5,..., а на числа 1, 3, 2, —1, —3, —2, ...

Адже $6 = 7 - 1$, і тому, відкинувши сімку, ми знайдемо, що замість числа 6 можна взяти -1. Так само замість 4 можна взяти -3, а замість 5 можна взяти -2. Робиться це для того, щоб доводилося множити на менші числа. Наприклад, для з'ясування подільності числа 25 518 на 7 складаємо алгебраїчну суму:

$$8 \cdot 1 + 1 \cdot 3 + 5 \cdot 2 - 5 \cdot 1 - 2 \cdot 3 = 10;$$

ми бачимо, що остача від ділення числа 25 518 на 7 дорівнює трьом.

Рекомендуємо читачеві самостійно перевірити (вважаючи, що 10 є лишок за модулем 17), що для з'ясування подільності деякого многоцифрового числа на 17, треба його цифри множити (знову ж, рахуючи їх справа наліво) на такі числа:

$$1, 10, 15, 14, 4, 6, \ldots$$

або (заміняючи деякі з них від'ємними) на числа

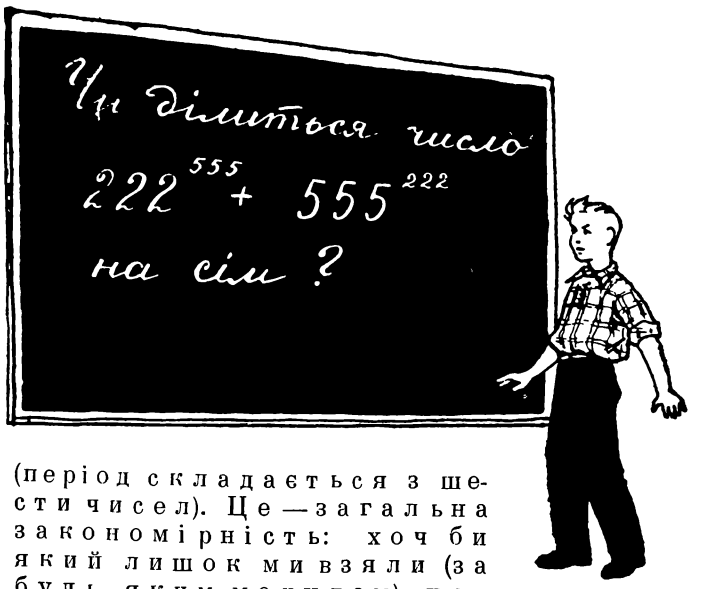
$$1, -7, -2, -3, 4, 6, \ldots$$

ТЕОРЕМА ФЕРМА

На перший погляд вказані ознаки подільності (наприклад, на 7 і на 17) мають один великий недолік: якщо дане число дуже велике, тобто має багато десяткових знаків, то, застосовуючи цю ознаку, треба буде насамперед провести додаткові обчислення, щоб дізнатися, на які множники треба множити наступні цифри. Інакше кажучи, треба обчислити остачі від ділення (скажімо, на 7) не тільки чисел 10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5, але й дальших степенів 10^6, 10^7,..., причому чим більше цифр у числі, тим для більшої кількості степенів числа 10 треба знати остачі від ділення (на 7). Полічимо, для прикладу, остачі від ділення на 7 чисел 1, 10, 10^2, 10^3 і т. д. до 10^{20}. Як ми знаємо, для цього треба 3 підносити до степеня, вважаючи, що 3 є лишок за модулем 7. Якщо ми вже піднесли лишок 3 до степеня k, то для піднесення його до степеня $k + 1$ треба просто помножити результат ще раз на 3. Інакше кажучи, кожен наступний лишок діставатимемо з попереднього множенням на 3. Знаючи це і користуючись таблицею множення лишків за модулем 7, легко знаходимо лишки

$$1, 3, 2, 6, 4, 5, 1, 3, 2, 6, 4, 5, 1, 3, 2, 6, 4, 5, 1, 3, 2, \quad (2)$$

які є остачами від ділення на 7 чисел 1, 10, 10^2, 10^3,..., 10^{20}. Відразу ж впадає в око, що ці остачі періодично повторюються



(період складається з шести чисел). Це — загальна закономірність: хоч би який лишок ми взяли (за будь-яким модулем), при піднесенні його до послідовних степенів (1-го, 2-го, 3-го і т. д.) діставатимемо результати, які періодично повторюються. Неважко зрозуміти, чому це відбувається. Наприклад, в послідовності (2) кожен наступний лишок діставали з попереднього множенням на 3. Але ж лишків є тільки скінченне число, так що через деякий час нам обов'язково зустрінеться лишок, який уже стояв у цій послідовності раніше; нехай, наприклад, на сьомому місці зустрівся такий же лишок, як і на першому; на восьмому місці буде такий же лишок, як і на другому: їх дістаємо з лишків, що стоять на сьомому і першому місці, множенням на 3. Далі, на дев'ятому місці буде такий же лишок, як і на третьому, і т. д. Таким чином, з сьомого місця будуть знову повторюватися ті самі лишки, які йшли, починаючи з першого місця.

Отже, остачі від ділення чисел 1, 10, 10^2, 10^3,... на яке-небудь число періодично повторюються, так що треба знати лише повторюваний період, і можна буде застосувати ознаку подільності до як завгодно великих чисел.

Природно, виникає питання: яка величина цього періоду? Наприклад, якщо ми розглядаємо остачі від ділення чисел 1, 10^1, 10^2, 10^3,... на 17, то через скільки чисел ці остачі почнуть повторюватися? Відповідь на це питання дає така теорема, яку довів видатний математик XVII ст. Ферма.

Якщо p — просте число і a — деякий лишок за модулем p, то лишки

$$a,\ a^2,\ a^3,\ a^4,\ a^5,\ \ldots \qquad (3)$$

періодично повторюються, причому довжина періоду (тобто число членів цієї послідовності, після яких починається повторення) є дільником числа $p-1$. Інакше кажучи, число $p-1$ або само є періодом, або дорівнює кільком періодам. Отже, через кожні $p-1$ членів у послідовності (3) обов'язково все повторюється, тобто

$$a^n = a^{n+(p-1)}.$$

Зокрема, при $n=1$ дістаємо: якщо p — просте число і a — деякий лишок за модулем p, то має місце співвідношення $a = a^p$. Інше формулювання: якщо p — просте число, а a — довільне число, то числа a і a^p мають одну й ту ж остачу від ділення на p, тобто різниця $a^p - a$ ділиться на p.

У такому вигляді часто і формулюють теорему Ферма.

Застосуємо теорему Ферма до розв'язання такої задачі: яка остача від ділення на 7 числа $222^{555}+555^{222}$?

Насамперед замінимо основи степенів їх остачами від ділення на 7, тобто замінимо дане число таким:

$$5^{555} + 2^{222}.$$

Відповіддю на запитання буде самий цей вираз $5^{555} + 2^{222}$, якщо основи степенів 5 і 2 вважати лишками за модулем 7. Через те що 7 — просте число, то внаслідок теореми Ферма через кожні 6 членів у послідовностях $2^1, 2^2, 2^3, \ldots$; $5^1, 5^2, 5^3, \ldots$ обов'язково все повторюється. Число 555 має остачу 3 при діленні на 6, а число 222 ділиться на 6. Тому

$$5^{555} = 5^3, \quad 2^{222} = 2^0,$$

або

$$5^{555} = 5^3 = 5 \cdot 5 \cdot 5 = 4 \cdot 5 = 6; \quad 2^{222} = 2^0 = 1.$$

Таким чином, $5^{555} + 2^{222} = 6 + 1 = 0$, тобто спочатку задане число $222^{555} + 555^{222}$ ділиться на 7.

ОДИН СЕКРЕТ ШВИДКОЇ ЛІЧБИ

Ваш друг задумав деяке ціле число, підніс його до куба, повідомив результат: 19 034 163 — і запропонував відгадати задумане число, тобто з числа 19 034 163 добути кубічний корінь: $\sqrt[3]{19\,034\,163}$.

Після недовгих роздумувань ви повідомляєте результат: 267.

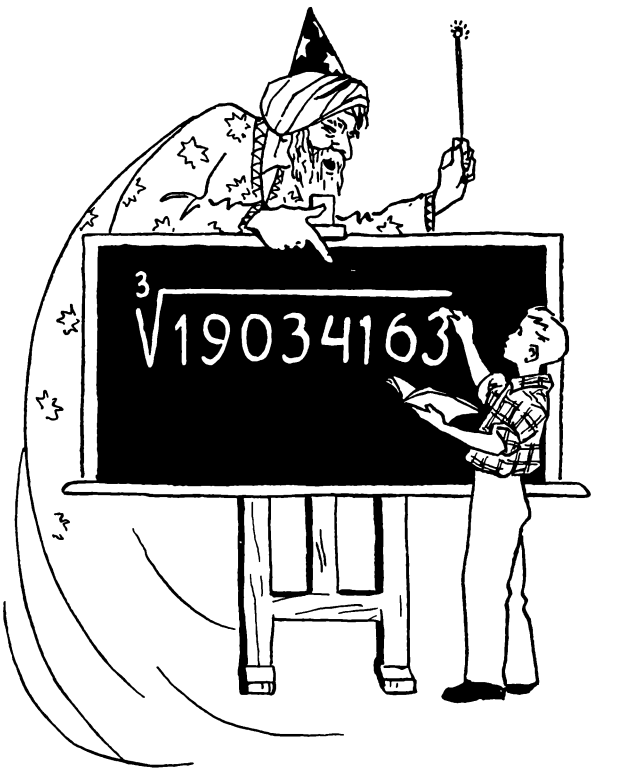
Друг здивований: він повторює випробування, пропонуючи добути кубічний корінь з інших восьмицифрових чисел, але щоразу ви швидко і успішно справляєтесь із задачею.

Оволодіти такою майстерністю неважко; для цього треба запам'ятати, якою цифрою закінчується куб кожного з чисел першого десятка (у звичайній арифметиці): $1^3 = 1$, $2^3 = 8$; $3^3 = 27$, $4^3 = 64$, $5^3 = 125$, $6^3 = 216$, $7^3 = 343$, $8^3 = 512$, $9^3 = 729$, $10^3 = 1000$, і запам'ятати (або мати в своєму розпорядженні) таблицю кубів цих же чисел в арифметиці лишків за модулем 11.

Таблиця лишків за модулем 11 та їх кубів

Лишки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Їх куби	0	1	8	5	9	4	7	2	6	3	10

Тепер міркуємо так: 100^3 — це мільйон; 1000^3 — це тисяча мільйонів; значить, $\sqrt[3]{19\,034\,163}$ більше від ста, але менше від



тисячі, тобто є числом трицифровим; остання цифра цього трицифрового числа 7 (визначаємо за останньою цифрою підкореневого числа), а перша цифра 2 (визначаємо з міркування: $200^3 = 8$ мільйонів, $300^3 = 27$ мільйонів, а під знаком радикала є проміжне число — 19 мільйонів). Залишається визначити середню цифру x числа $2x7$.

Замінимо підкореневе число його остачею від ділення на 11. Ця остача така сама, як у різниці між сумою цифр, що стоять на непарних місцях (справа наліво), і сумою цифр, що стоять на парних місцях: $(3 + 1 + 3 + 9) - (6 + 4 + 1) = 5$. Остача від ділення числа 19 034 163 на 11 дорівнює п'ятьом. Визначаємо за таблицею, що лишок 5 — це куб лишку 3; значить, остача від ділення на 11 шуканого числа $2x7$ з невідомою цифрою x десятків дорівнює 3. Звідси легко визначається x:

$$3 = (7 + 2) - x; \quad x = 6.$$

Результат готовий: $\sqrt[3]{19\,034\,163} = 267$.

Ще приклад. Обчислити $\sqrt[3]{573\,856\,191}$.

Схема розв'язування: шукане число — трицифрове; перша цифра 8, остання 1; остача від ділення підкореневого числа на 11 така ж, як у різниці 15—30, а ця різниця в арифметиці лишків за модулем 11 дорівнює 7; значить, і остача дорівнює семи; лишок 7 — це куб лишку 6 (див. таблицю). Щоб остача від ділення шуканого числа на 11 дорівнювала 6, середня цифра повинна бути числом $(8 + 1) - 6 = 3$. Шукане число: 831.

ПОНЯТТЯ МНОЖИНИ

МНОЖИНИ СКІНЧЕННІ І НЕСКІНЧЕННІ

Звичайно арифметику визначають як науку про числа. Числа в найпростішому розумінні слова, тобто так звані натуральні числа:

$$1, 2, 3, 4, 5, \ldots,$$

відповідають на запитання «скільки»: скільки учнів у класі? Скільки книг лежить на столі? Скільки гусей плаває на ставку?

Але щоразу, коли ми запитуємо: «Скільки предметів?» — ми повинні мати ці предмети, їх сукупність. Ось ми і говоримо про сукупність усіх учнів, що утворюють даний клас, про сукупність книг, які лежать на столі, про сукупність гусей, що плавають на ставку. Кожне натуральне число є число предметів (живих чи неживих), які утворюють деяку сукупність. Іноді ці предмети легко полічити, наприклад, коли мова йде про число книг, що лежать на столі, або про число учнів, які сидять у класі.

Але значно важче відповісти на запитання, скільки в даний момент плаває китів у світовому океані або навіть скільки їжаків живе в підмосковних лісах. І вже зовсім важко точно сказати, скільки молекул у склянці води або зір у нашій Галактиці. Однак в усіх цих випадках ми впевнені, що число це скінченне, хоч, можливо, і дуже велике та недоступне для точного обчислення при даному стані наших наукових знань.

У математиці розглядаються не тільки скінченні, а й нескінченні сукупності. Найпростішим прикладом такої сукупності є сукупність, або, як прийнято говорити, множина, всіх натуральних чисел:

$$1, 2, 3, 4, 5, \ldots$$

Ми вже сказали, що кожне натуральне число є число предметів, які утворюють ту чи іншу скінченну сукупність, ту чи іншу множину. Але множина всіх натуральних чисел вже не є скінченна множина. На запитання: «Скільки всього натуральних чисел?» — доводиться відповісти, що їх безліч. Хоч би яке велике число натуральних чисел ми задумали, завжди є такі натуральні числа, які не ввійшли в число задуманих.

У математиці ми постійно стикаємося з прикладами нескінченних множин. Візьмемо, наприклад, рівносторонній трикутник T_1; впишемо в нього рівносторонній трикутник T_2. Вершини трикутника T_2 є середини сторін трикутника T_1. Таким же способом впишемо в T_2 рівносторонній трикутник T_3, в T_3 впишемо T_4 і так далі (рис. 1). Ця побудова при-

водить до нескінченної множини рівносторонніх трикутників:

$$T_1,\ T_2,\ T_3,\ T_4,\ T_5,\ \ldots,\ T_n,\ \ldots \qquad (1)$$

Тим більше нескінченною є множина всіх взагалі рівносторонніх трикутників, що лежать у даній площині.

Останнє речення дещо двозначне: слово «більше» можна сприйняти в ньому як складову частину виразу «тим більше», вжитого в розумінні «і поготів». Якщо є вже нескінченна множина рівносторонніх трикутників, що утворюються при деякій певній побудові, то і поготів множина всіх рівносторонніх трикутників нескінченна. Але слово «більше» можна зрозуміти і як порівняльний степінь прикметника, і тоді висловлене вище судження означає, що множина всіх рівносторонніх трикутників, які лежать у даній площині, в якомусь розумінні є «більш нескінченною», ніж нескінченна множина побудованих нами трикутників

$$T_1,\ T_2,\ T_3,\ \ldots,\ T_n,\ \ldots$$

Як бачите, ми торкнулися цікавого питання, яке довгий час лякало вчених своєю (а втім, лише уявною) парадоксальністю: чи існують, якщо можна так висловитися, різні степені нескінченності? Чи можлива кількісна оцінка нескінченних множин, яка дозволяє твердити,

що одна з двох нескінченних множин є «більш нескінченною», ніж інша? Або ж твердження, що дана множина є нескінченною, остаточне в тому розумінні, що не дає можливості для дальших розрізнянь або градацій кількісного характеру.

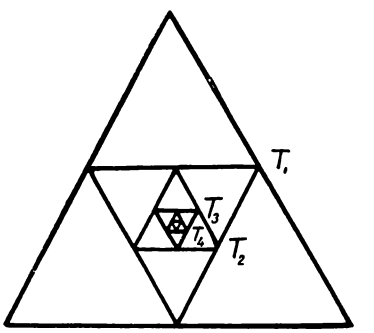


Рис. 1.

Першим, хто намагався відповісти на це запитання, був знаменитий чеський математик і філософ Бернгард Больцано (1781—1848), але він не зумів повністю перебороти всі труднощі, які при цьому виникли. Постараємося розібратися, в чому ці труднощі і як було розв'язано поставлене питання.

ВЗАЄМНО ОДНОЗНАЧНА ВІДПОВІДНІСТЬ МІЖ ДВОМА МНОЖИНАМИ

Припустимо, що ми маємо дві скінченні множини, наприклад кошик яблук і кошик груш. Бажаючи встановити, чого у нас більше — яблук чи груш, ми можемо (і це буде найпростіше вирішення питання) підрахувати число плодів у кожному кошику. Дістанемо два числа; порівняння їх і дасть відповідь на наше запитання.

Але якщо ми маємо дві нескінченні множини, то визначити аналогічно, яка з них є «більш нескінченною», а яка — «менш», не можна з тієї простої причини, що нескінченну множину не можна «полічити». В усякому разі ми не знаємо, як це зробити. Тому постараємося відповісти на запитання, чого у нас більше: яблук чи груш, не підраховуючи їх, тобто не користуючись поняттям числа. Ось який для цього є шлях.

Розкладемо наші яблука, хоч би на столі, і спробуємо поставити проти кожного яблука по груші. Можливі три випадки (рис. 2).

Перший випадок: проти кожного яблука буде груша, і при цьому не тільки всі яблука, а й усі груші будуть розкладені. В цьому випадку, очевидно, у нас стільки ж яблук, скільки і груш.

Другий випадок: проти кожного яблука буде по груші, але при цьому ще залишиться кілька груш у кошику — в цьому випадку у нас більше груш, ніж яблук.

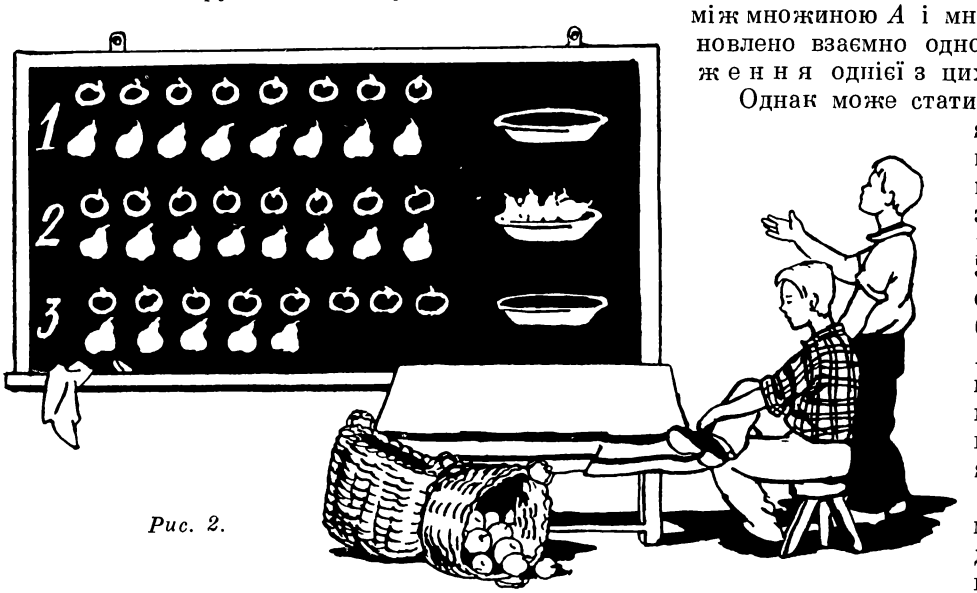


Рис. 2.

Нарешті, можливий останній, третій, випадок: намагаючись розкласти всі груші так, щоб проти кожного яблука лежала груша, ми не досягнемо мети — нам не вистачить груш. Тоді, очевидно, груш менше, ніж яблук.

Ви бачите, ми змогли дати кількісну оцінку двох множин — кошика яблук і кошика груш, не рахуючи точно, скільки є тих і других плодів, але встановивши, яких плодів більше, або переконавшись, що їх є однакова кількість. Цю оцінку ми дали, встановивши, як кажуть, взаємно однозначну відповідність між однією множиною і другою або частиною другої. Можливо, читач на цьому одному прикладі ще не з'ясував собі, що таке взаємно однозначна відповідність між двома множинами, тому наведемо ще кілька прикладів.

Дається концерт. Щоб на нього піти, треба купити квитка. Перед нами дві множини: множина людей, які хочуть піти на цей концерт, — позначимо її через A — і множина квитків — позначимо її через B. Можливі різні випадки. Перший (не дуже ймовірний, але математично найпростіший): всі бажаючі піти на концерт придбали квитки, і всі квитки при цьому були продані. Тоді кожному елементові множини A (тобто кожній особі, яка бажає піти на концерт) відповідає певний елемент множини B (куплений цією особою квиток). При цьому кожен елемент множини B поставлений у відповідність одному єдиному елементові множини A (особі, яка купила цей квиток). Установлена взаємно однозначна відповідність між множиною A і множиною B, або встановлено взаємно однозначне відображення однієї з цих множин на другу.

Однак може статися, що кожна особа, яка бажала піти на концерт, купила собі квитка, але в касі залишилися ще не розпродані квитки. Знову виходить взаємно однозначне відображення множини A, але вже не на всю множину B, а тільки на деяку її частину — на ту частину, або, як кажуть, на ту підмножину множини B, яка складається з усіх проданих квитків. Може,

нарешті, трапитися, що всі квитки продано, але не всі бажаючі піти на концерт змогли купити квитки. Тоді позначимо через A' множину тих людей, які не тільки хотіли піти на концерт, але й дістали на нього квитки. Множина A' виявилась взаємно однозначно відображеною на множину B.

У математиці можна знайти численні приклади взаємно однозначних відповідностей. Наприклад, кожній вершині трикутника або тетраедра відповідає протилежна цій вершині сторона або грань. Таким чином, встановлена взаємно однозначна відповідність між множиною всіх вершин трикутника (тетраедра) і множиною всіх його сторін (граней). Множина всіх сторін правильного многокутника перебуває у взаємно однозначній відповідності з множиною всіх перпендикулярів, які опущені на ці сторони з центра правильного многокутника. Множина всіх бічних граней піраміди перебуває у взаємно однозначній відповідності з множиною апофем цієї піраміди і т. д.

Особливо істотним є той факт, що взаємно однозначна відповідність можлива і між деякими нескінченними множинами. Наведемо приклади. Позначимо через A множину всіх точок даного кола, а через B — множину всіх прямих, які є дотичними до цього кола (рис. 3). Між множинами A і B буде встановлено взаємно однозначну відповідність, якщо ми кожній точці кола поставимо у відповідність дотичну в цій точці. Таким чином, кожному елементу множини A відповідає єдиний елемент множини B і кожний елемент множини B (тобто кожна дотична) при цьому поставлений у відповідність єдиному елементу множини A — точці дотику даної дотичної.

Другий приклад. Візьмемо дві пересічні прямі a_1 і b_1 (рис. 3). Позначимо через A множину всіх точок прямої a_1, а через B — множину, яка складається з прямої b_1 і з усіх прямих, їй паралельних. Кожному елементу b множини B (тобто кожній прямій b, паралельній прямій b_1 або такій, що збігається з нею) відповідає єдиний елемент множини A — єдина точка прямої a_1, в якій її перетинає пряма b.

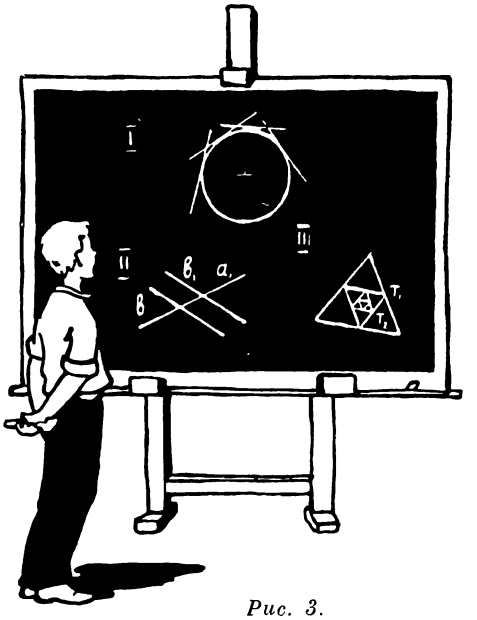


Рис. 3.

Як третій приклад візьмемо вже розглянуту нами множину рівносторонніх трикутників:

$$T_1,\ T_2,\ \ldots,\ T_n,\ \ldots,$$

кожен з яких, крім першого, вписаний у попередній. Множину всіх цих трикутників позначимо через X. Кожен трикутник дістав певне натуральне число n як свій номер.

Номером трикутника T_n є натуральне число n. Цим, очевидно, встановлена взаємно однозначна відповідність між множиною X наших трикутників і множиною всіх натуральних чисел.

ЗЧИСЛЕННІ МНОЖИНИ

Взагалі, якщо всі елементи якої-небудь множини X удається занумерувати за допомогою натуральних чисел так, що кожне натуральне число відповідатиме як номер лише одному елементу множини X, то такою нумерацією встановлюється взаємно однозначна відповідність між даною множиною X і множиною всіх натуральних чисел. І навпаки, всяку взаємно однозначну відповідність між якою-небудь множиною X і множиною всіх натуральних чисел можна розглядати як нумерацію (перелічення) елементів множини X за допомогою натуральних чисел — ми просто приписуємо кожному елементу множини X як номер натуральне число, що відповідає йому.

Ми тут торкнулися дуже важливого поняття. Адже встановлення взаємно однозначної відповідності між деякою множиною X і множиною всіх натуральних чисел є безпосереднє перенесення в область нескінченних множин перелічування якої-небудь скінченної множини (наприклад, кошика яблук або стада гусей) з допомогою натуральних чисел. Тільки у випадку скінченних множин для перелічування елементів множини потрібно лише скінченне число чисел (ми лічимо: один, два, три і так далі до того числа, яке показує, скільки у нас яблук у кошику або гусей у стаді). У прикладі множини трикутників

$$T_1,\ T_2,\ T_3,\ \ldots,\ T_n,\ \ldots$$

або взагалі будь-якої множини X, яку можна привести до взаємно однозначної відповідності

з множиною всіх натуральних чисел, ми змушені як номерами користуватися всіма натуральними числами.

Але тепер виникає найголовніше, основне для всієї теорії множин питання. Чи завжди можна занумерувати елементи нескінченної множини натуральними числами так, щоб кожен елемент даної множини дістав певний номер?

Інакше кажучи: чи можна встановити взаємно однозначну відповідність між довільною нескінченною множиною і множиною всіх натуральних чисел?

Виявляється, відповідь на це запитання — негативна, і ми постараємося переконатися в цьому. Але спочатку трохи підготуємося. Насамперед встановимо назву для тих множин, які можуть бути поставлені у взаємно однозначну відповідність з множиною всіх натуральних чисел. Ці множини називаються з ч и с л е н н и м и. Ця назва природна: зчисленна множина — це така множина, яку можна перелічити за допомогою натуральних чисел. Наше завдання — показати, що існують незчисленні множини, тобто такі, які не можна поставити у взаємно однозначну відповідність з множиною всіх натуральних чисел.

МНОЖИНА ВСІХ РАЦІОНАЛЬНИХ ЧИСЕЛ ЗЧИСЛЕННА

Шукаючи незчисленну множину, звернемося до множини всіх раціональних чисел (читач, звичайно, пам'ятає, що раціональними називаються всі цілі і всі дробові числа). Подивимося, чи можна занумерувати всі раціональні числа за допомогою натуральних. Для спрощення розглянемо спочатку всі додатні раціональні числа і спробуємо їх як-небудь занумерувати. Ми відразу ж натрапляємо на трудність: серед додатних раціональних чисел завідомо немає найменшого числа, яким є одиниця серед натуральних чисел: адже хоч би яке було додатне раціональне число r, число $\frac{1}{2}r$ також є додатним раціональним числом, і воно менше, ніж r. Але припустимо, що ми обійдемо ці труднощі, почавши нашу лічбу з якого-небудь раціонального числа r_1, яке умовимося вважати першим. Але тоді на наступному етапі виникає така трудність: яке раціональне число вважати другим, тобто таким, що безпосередньо йде в порядку нашої лічби за числом r_1? Справа в тому, що хоч би яке раціональне число $r_2 > r_1$ ми взяли, є раціональні числа, більші ніж r_1 і менші ніж r_2, і таких нескінченна множина: наприклад, числа

$$r_3 = \frac{1}{2}(r_1 + r_2), \quad r_4 = \frac{1}{2}(r_1 + r_3), \ \ldots$$

Таким чином, серед усіх раціональних чисел, більших, ніж вибране нами число r_1, немає найменшого. Яке ж назвати першим з тих, що йдуть за r_1? Але трудність, що виникла,— уявна. Вона показує тільки, що не можна занумерувати раціональні числа з допомогою натуральних чисел так, щоб при цій нумерації зростаючим номерам відповідали зростаючі числа. Доведеться спробувати занумерувати раціональні числа як-небудь інакше, не прагнучи до того, щоб число r_2, перше після r_1 в порядку нашої лічби, було і першим за величиною, тобто найменшим з усіх, що йдуть за r_1. А тоді потрібну нам нумерацію знайти дуже легко.

Справді, кожне додатне раціональне число однозначно записується у вигляді нескоротного дробу $\frac{p}{q}$ (ціле число n будемо при цьому записувати у вигляді дробу $\frac{n}{1}$ і також вважати його нескоротним). Назвемо в и с о т о ю дробу $\frac{p}{q}$ натуральне число $p + q$. Під висотою раціонального числа ми будемо розуміти висоту того єдиного нескоротного дробу, який є записом даного раціонального числа.

Поглянемо, скільки раціональних чисел припадає на кожну дану висоту. Висоту 1 не має жодне додатне раціональне число (бо, записуючи раціональне число у вигляді нескоротного дробу $\frac{p}{q}$, бачимо, що його висота дорівнює натуральному числу $p + q$, а через те що $p \geqslant 1$, $q \geqslant 1$, то $p+q \geqslant 2$). Висоту 2 має, очевидно, єдине раціональне число $\frac{1}{1} = 1$.

Висоту 3 мають дроби $\frac{1}{2}$ і $\frac{2}{1}$, тобто раціональні числа $\frac{1}{2}$ і 2.

Висоту 4 мають дроби $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{2}$, $\frac{3}{1}$.

Серед них залишаємо лише нескоротні: $\frac{1}{3}$ і $\frac{3}{1}$.

Отже, висоту 4 мають раціональні числа $\frac{1}{3}$ і 3.

Висоту 5 мають дроби

$$\frac{1}{4}, \ \frac{2}{3}, \ \frac{3}{2}, \ \frac{4}{1},$$

серед яких немає скоротних, так що на висоту 5 припадає 4 числа.

Висоту 6 мають дроби

$$\frac{1}{5}, \frac{2}{4}, \frac{3}{3}, \frac{4}{2}, \frac{5}{1},$$

серед яких нескоротними є лише перший і останній, отже, висоту 6 мають числа $\frac{1}{5}$ і 5.

Міркуючи так далі, ми насамперед переконуємося в тому, що, хоч би яке було натуральне число $h>1$, є лише одне скінченне число раціональних чисел з цією висстою.

Справді, дроби з висотою h — це, очевидно,

$$\frac{1}{h-1}, \frac{2}{h-2}, \ldots, \frac{h-1}{1}.$$

Їх скінченне число: $h-1$. Серед цих дробів деякі можуть бути скоротними, а решта дадуть раціональні числа з висотою h.

Тепер уже дуже легко занумерувати всі додатні раціональні числа: ми починаємо з найменшої висоти 2 і йдемо далі, весь час збільшуючи на одиницю висоту і підраховуючи те (завжди скінченне) число раціональних чисел, яке припадає на дану висоту.

Таким чином, число $1 = r_1$ дістає номер 1. Далі йдуть два числа $r_2 = \frac{1}{2}$ і $r_3 = 2$ висоти 3, потім два числа $r_4 = \frac{1}{3}$ і $r_5 = 3$ висоти 4, далі чотири числа $r_6 = \frac{1}{4}$, $r_7 = \frac{2}{3}$, $r_8 = \frac{3}{2}$, $r_9 = 4$ висоти 5, два числа $r_{10} = \frac{1}{5}$, $r_{11} = 5$ висоти 6 і т. д. Дістаємо таблицю (через n_h позначено число раціональних чисел висоти h).

Висота	Число даної висоти
2	$r_1\,(n_2 = 1)$
3	$r_2,\ r_3\,(n_3 = 2)$
4	$r_4,\ r_5\,(n_4 = 2)$
5	$r_6,\ r_7,\ r_8,\ r_9\,(n_5 = 4)$
. . . . .	

Через те що кожне раціональне число має своєю висотою деяке натуральне число h, воно знайде своє місце в рядку, що відповідає цій висоті, і дістане певний номер, не більший, ніж число $n_2+n_3+\ldots+n_{h-1}+n_h$.

Отже, множина всіх додатних раціональних чисел є зчисленна множина.

МНОЖИНА ВСІХ ДІЙСНИХ ЧИСЕЛ НЕЗЧИСЛЕННА

Однак незчисленні множини існують. Виявляється, що множина всіх дійсних чисел — незчисленна. Цей визначний факт, як і теорему про зчисленність множини всіх раціональних чисел, вперше довів знаменитий німецький математик Георг Кантор (1845 — 1918), засновник сучасної теорії множин.

Відтворюємо доведення Кантора. Доводимо, що незчисленною є вже множина всіх дійсних чисел інтервалу (0; 1)[1].

Кожне таке дійсне число можна записати у вигляді нескінченного десяткового дробу з цілою частиною нуль. При цьому кожному дійсному числу відповідає лише один такий запис, за винятком дійсних чисел, що виражаються скінченними десятковими дробами: кожне таке число, наприклад 0,2476622021711, можна записати двома способами у вигляді нескінченного десяткового дробу:

0,24766220217110000000000...

і

0,24766220217109999999999...

Один з цих записів, починаючи з деякого моменту, містить самі лише нулі, а другий — самі дев'ятки. Якщо ми умовимося не вживати записів, в яких, починаючи з якого-небудь місця, йдуть самі дев'ятки, то кожне дійсне число матиме лише єдиний запис у вигляді нескінченного десяткового дробу. Доведемо тепер теорему про незчисленність множини дійсних чисел від супротивного: припустимо, що множина всіх дійсних чисел [ми говоримо весь час про числа x інтервалу (0; 1)] зчисленна, тобто може бути занумерована за допомогою натуральних чисел. Тоді всю сукупність дійсних чисел інтервалу (0; 1) можна буде записати у вигляді послідовності:

$$x_1,\ x_2, \ldots$$

Запишемо розклад числа x_n у нескінченний десятковий дріб у вигляді

$$x_n = 0,a_1^{(n)}a_2^{(n)}a_3^{(n)}a_4^{(n)} \ldots a_n^{(n)}\ldots,$$

де $a_1^{(n)}$, $a_2^{(n)}$, $a_3^{(n)}$, ... — послідовні десяткові знаки числа x_n, причому, згідно з умовою, неможливо, щоб усі десяткові знаки, починаючи з деякого, були дев'ятками.

[1] Під інтервалом (a, b) числової прямої розуміємо множину всіх дійсних чисел x, які задовольняють нерівності $a<x<b$.

Отже, всі дійсні числа x [інтервалу (0; 1)] вважаємо записаними у вигляді

$$\text{(I)}\quad \begin{cases} x_1 = 0, a_1^{(1)}a_2^{(1)}a_3^{(1)}a_4^{(1)}a_5^{(1)} \dots a_n^{(1)} \dots \\ x_2 = 0, a_1^{(2)}a_2^{(2)}a_3^{(2)}a_4^{(2)}a_5^{(2)} \dots a_n^{(2)} \dots \\ x_3 = 0, a_1^{(3)}a_2^{(3)}a_3^{(3)}a_4^{(3)}a_5^{(3)} \dots a_n^{(3)} \dots \\ x_4 = 0, a_1^{(4)}a_2^{(4)}a_3^{(4)}a_4^{(4)}a_5^{(4)} \dots a_n^{(4)} \dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ x_n = 0, a_1^{(n)}a_2^{(n)}a_3^{(n)}a_4^{(n)}a_5^{(n)} \dots a_n^{(n)} \dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \end{cases}$$

Приведемо наше припущення до суперечності, знайшовши дійсне число ξ, яке міститься між 0 і 1 і завідомо не входить у таблицю (I). Для цього розглянемо цифри, що стоять по діагоналі таблиці (I), а саме:

$$a_1^{(1)},\ a_2^{(2)},\ a_3^{(3)},\ a_4^{(4)},\ a_5^{(5)},\ \dots,\ a_n^{(n)},$$

і виберемо для кожного n натуральне число b_n, яке не перевищує числа 8 і відмінне від числа $a_n^{(n)}$ (наприклад, при $a_n^{(n)} < 8$ вважаємо $b_n = a_n^{(n)} + 1$, а при $a_n^{(n)} = 8$ вважаємо $b_n = 7$).

Розглянемо нескінченний десятковий дріб

$$0, b_1b_2b_3b_4b_5 \dots b_n \dots .$$

Він не містить жодної дев'ятки і виражає число ξ, яке міститься між 0 і 1 і завідомо відмінне від усіх чисел $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, \dots$. Справді, коли б було

$$\xi = x_n = 0, a_1^{(n)}a_2^{(n)} \dots a_n^{(n)} \dots,$$

то на n-му місці в розкладі числа ξ ми повинні були б мати цифру $a_n^{(n)}$, тоді як насправді маємо $b_n \neq a_n^{(n)}$.

Теорему доведено.

ПОТУЖНІСТЬ МНОЖИНИ

Нам треба осмислити одержаний результат і підвести деякі підсумки всьому, що говорилося досі. Ми почали з поняття взаємно однозначної відповідності між двома множинами, можливість якої (у випадку скінченних множин) рівносильна тому, що обидві множини складаються з одного й того ж числа елементів.

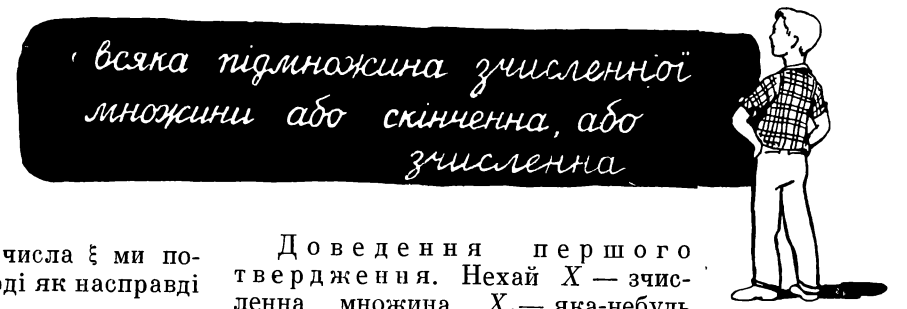
Ця обставина вказує шлях і до встановлення «кількісної рівності», або *кількісної еквівалентності*, між двома нескінченними множинами. Ми скажемо, що дві (скінченних або нескінченних) множини кількісно еквівалентні або мають одну й ту ж *потужність*, якщо між ними можна встановити взаємно однозначну відповідність. Поняття «однакової потужності» означає для скінченних множин, що вони складаються з одного й того ж числа елементів.

Далі, скажемо, що множина A має більшу потужність, ніж множина B, якщо можна множину B відобразити взаємно однозначно на частину множини A і в той же час не можна відобразити множину A на частину множини B. Тепер можемо сказати, що зчисленні множини — це множини, кількісно еквівалентні множині натуральних чисел. Але існують множини і незчисленні, наприклад, множина всіх дійсних чисел, які містяться між 0 і 1, або, як прийнято говорити, інтервалу (0, 1) і, як неважко бачити, будь-якого інтервалу[1].

Щоб переконатися в тому, що всяка незчисленна множина має більшу потужність, ніж кожна зчисленна множина (всі зчисленні множини мають, очевидно, одну й ту ж потужність), треба довести такі два твердження:

1. *Всяка підмножина зчисленної множини або скінченна, або зчисленна.*

2. *Всяка нескінченна (отже, зокрема, всяка незчисленна) множина містить зчисленну.*



Доведення першого твердження. Нехай X — зчисленна множина, X_0 — яка-небудь підмножина множини X. Елементи множини X можуть бути занумеровані з допомогою натуральних чисел, тобто записані у вигляді

$$x_1,\ x_2,\ x_3,\ \dots,\ x_n, \dots \qquad (2)$$

Серед цих елементів є і всі елементи множини X_0. Нехай це будуть — в порядку зростання номерів у послідовності (2) — елементи

$$x_{n_1},\ x_{n_2},\ x_{n_3},\ \dots,\ x_{n_k},\ \dots \qquad (3)$$

Можливе одне з двох: або послідовність (3) обривається на якомусь скінченному кроці k,

[1] Будь-який інтервал числової прямої може бути (наприклад, подібним розтягненням або стисканням) взаємно однозначно відображений на інтервал (0; 1).

тобто множина X_0 складається з скінченного числа елементів x_{n_1}, x_{n_2}, ..., x_{n_k}, або ж ми маємо нескінченну послідовність x_{n_1}, x_{n_2}, ..., x_{n_k}, ..., яку можемо переписати, покладаючи

$$y_1 = x_{n_1},\ y_2 = x_{n_2},\ \ldots,\ y_k = x_{n_k},\ \ldots,$$

у вигляді

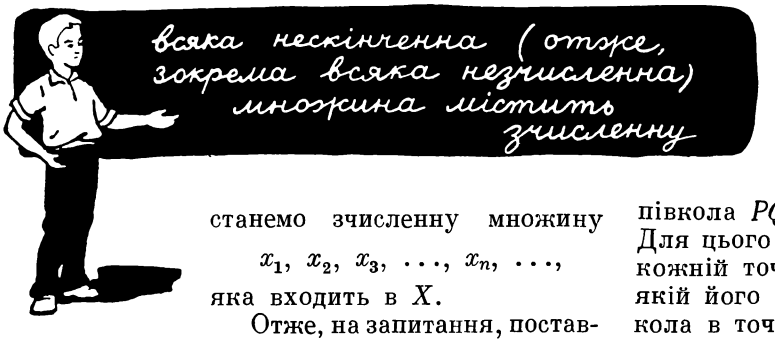
$$y_1,\ y_2,\ \ldots,\ y_k,\ \ldots;$$

з цього безпосередньо видно, що X_0 — зчисленна множина.

Доведення другого твердження. Нехай X — нескінченна множина. Вибираємо в X який-небудь елемент x_1. Безперечно, в X є елементи, відмінні від x_1 (інакше X складалася б з цього одного елемента і була б скінченною). Візьмемо один з таких елементів і позначимо його через x_2. Елементи x_1 і x_2 не вичерпують множини X, тому існує елемент x_3 множини X, відмінний як від x_1, так і від x_2. І так далі. Продовжуючи цей процес, дістанемо зчисленну множину

$$x_1,\ x_2,\ x_3,\ \ldots,\ x_n,\ \ldots,$$

яка входить в X.



Отже, на запитання, поставлене на початку нашого викладу,— чи існують нескінченні множини різних «степенів нескінченності» (тобто різних потужностей) — ми можемо відповісти ствердно: існують множини двох різних потужностей, що складаються з дійсних чисел,— множина всіх дійсних чисел якого-небудь інтервалу, з одного боку, і будь-яка зчисленна множина дійсних чисел (наприклад множина додатних раціональних чисел) — з другого. До цього висновку ми прийшли, обгрунтовуючи кількісну оцінку нескінченних множин за допомогою поняття взаємно однозначної відповідності. Однак не слід думати, що взаємно однозначна відповідність між нескінченними множинами в усьому подібна до взаємно однозначної відповідності між множинами скінченними.

Очевидно, жодну скінченну множину не можна взаємно однозначно відобразити на свою частину (частина ніколи не дорівнює цілому). Вже найпростіші приклади показують, що це твердження зразу ж перестає бути вірним в області нескінченних множин: ми бачили, що всяка нескінченна підмножина зчисленної множини зчисленна, тобто зчисленна множина може бути взаємно однозначно відображена на всяку свою нескінченну частину. Наприклад, підписуючи під усіма натуральними числами підряд усі парні

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, ...
2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, ... ,

дістанемо взаємно однозначну відповідність між множиною всіх натуральних чисел і її частиною — множиною самих лише парних чисел.

Другий приклад: існує взаємно однозначне відображення між множиною всіх дійсних чисел (між усією числовою прямою) і будь-яким її інтервалом.

Щоб дістати таку відповідність, можна зробити ось що. Побудуємо в площині коло, що дотикається зверху осі абсцис, і візьмемо нижнє півколо PQ цього кола (рис. 4). Кінці P і Q півкола до нього не зараховуються. Встановимо взаємно однозначну відповідність між усіма точками півкола PQ і всіма точками числової прямої. Для цього спочатку поставимо у відповідність кожній точці ξ прямої ту точку η півкола, в якій його перетинає промінь, що йде з центра кола в точку ξ.

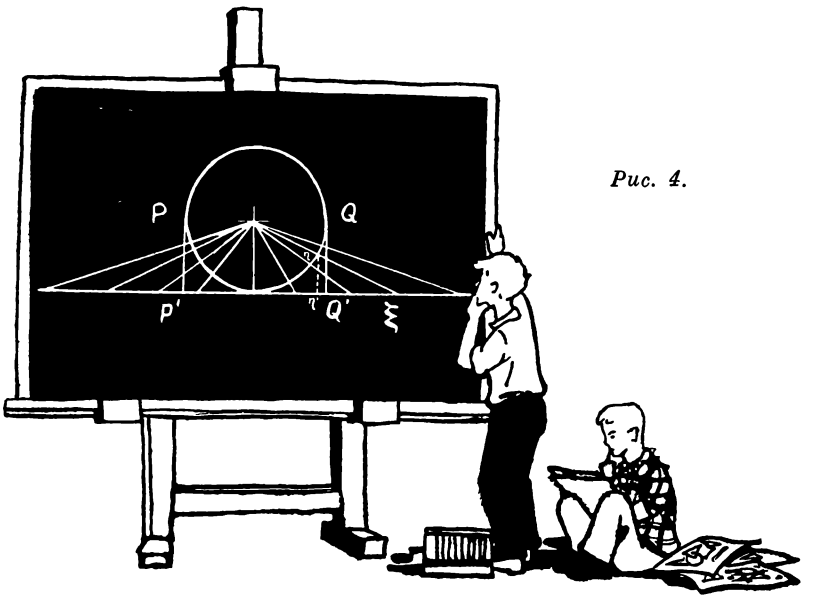


Рис. 4.

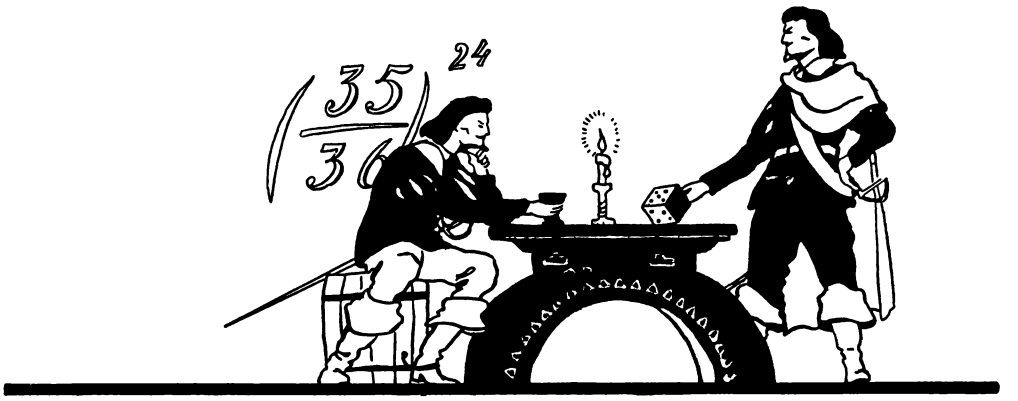
Тепер спроектуємо півколо PQ на інтервал $P'Q'$ осі абсцис і поставимо у відповідність точці η півкола її проекцію η'.

У результаті кожній точці ξ прямої поставлено у відповідність точку η' інтервалу $P'Q'$, і ця відповідність є взаємно однозначним відображенням всієї числової прямої на інтервал $P'Q'$.

Можна довести й інші, на перший погляд парадоксальні, теореми про потужність різних множин. Згадаємо лише одну з них: *існує взаємно однозначна відповідність між усіма точками прямої і всіма точками площини.*

Зауважимо, нарешті, що в математиці найбільше значення мають так звані числові множини, тобто множини, елементами яких є дійсні числа. Всі відомі тепер числові множини або зчисленні, або мають ту саму потужність, що й уся числова пряма. Виникла, таким чином, гіпотеза, що всяка незчисленна числова множина має ту саму потужність, що й уся числова пряма. Ця гіпотеза була висловлена ще Кантором і відома під назвою континуум-гіпотези. Вона не доведена досі, що зв'язано, очевидно, з великими загальнопізнавальними труднощами, які виникають при розгляді довільних числових множин. Ці труднощі висвітлюються в так званій математичній логіці, і ми про них тут, звичайно, говорити не можемо.

Ця стаття має своєю метою дати лише початкове уявлення про деякі найпростіші поняття широкої галузі математики — теорії множин, галузі, яка виникла менш як сто років тому. Читач, який хоче ознайомитися з теорією множин більш грунтовно, може звернутися, наприклад, до перших розділів книги П. С. Александрова «Введение в общую теорию множеств и функций», М., Гостехиздат, 1948.



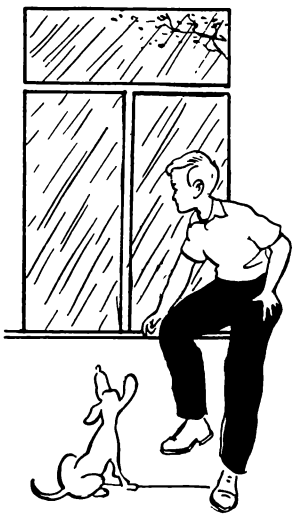
Перше знайомство з теорією імовірностей

НАУКА ПРО ВИПАДКОВЕ

Випадковим нам здається те, що порушує загальний хід подій. Ви поспішаєте до школи, сідаєте в автобус. Але автобус зіпсувався — і ви запізнилися на урок. Випадкова подія вплинула на сьогоднішній день, на звичайний розпорядок вашого життя.

Візьмемо другий приклад. Ви зібралися погуляти у вихідний день, але погода раптом змінилась настільки, що не можна вийти з дому. Знову непередбачене втручання випадку порушило нормальний хід подій у вашому житті.

Звичайно, не завжди випадкові події завдають прикрості. Ви проглядаєте, наприклад, таблицю виграшів лотереї і бачите номер вашого лотерейного білета; тут випадкове явище — виграш — вам на користь. Або, наприклад, ви зустріли на вулиці свого друга, не домовляючись з ним. Це теж приємна випадкова подія.



Спільною рисою всіх таких випадкових подій, однак, залишається те, що вони порушують нормальний, плавний хід явищ. Саме тому нерідко ми говоримо: з випадковостями треба боротися.

У суспільному житті випадкові події також можуть мати місце. Уявіть собі, наприклад, що врожай якої-небудь сільськогосподарської культури на даній ділянці загинув через несподівану засуху. Це — прикра випадковість. Є й багато інших прикрих випадковостей, яких поки що не може завбачити наука. Ми знаємо, наприклад, що землетрус, від якого терплять усі, хто живе в даній місцевості, — поки що непередбачена випадковість. Ми говоримо про «стихійні сили природи», які наука ще не може перебороти.

Але наука прагне дати людині обгрунтовані засоби боротьби з шкідливими випадковостями.

Які ж можуть бути засоби боротьби, наприклад, з випадковостями негоди? Можна всебічно вивчати життя рослин в умовах даної місцевості і проводити сівбу посухостійким або морозостійким насінням, якщо в цьому є потреба, — при цьому вплив випадковостей негоди на врожай буде менший. Можна намагатися визначити заздалегідь, будуть чи не будуть, скажімо, сильні заморозки навесні, і підготувати засоби укриття або обігрівання рослин залежно від цього. Можна, нарешті, спробувати знайти загальні закони, які керують чергуванням поганої і хорошої погоди, і вжити запобіжних заходів відповідно до цих законів.

У тих випадках, коли випадковість може дати користь, також бажано вивчити закони, за якими відбуваються випадкові явища, щоб зробити цю користь якнайбільшою.

ЧИ ІСНУЮТЬ ЗАКОНОМІРНОСТІ ВИПАДКОВИХ ЯВИЩ

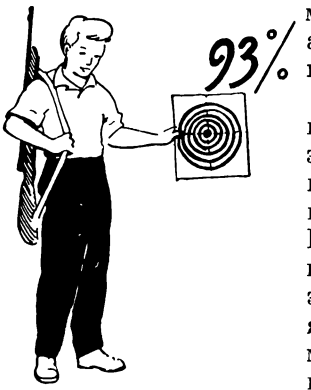
З першого погляду може здатися, що жодних законів, які керують випадковими подіями, бути не може: на те ці події і випадкові. Однак якщо придивитися до справи як слід, можна прийти до висновку, що й випадкові явища часто не зовсім вже й хаотичні. У багатьох випадках тут виявляються певні закономірності. Ці закономірності не подібні до звичайних законів фізичних явищ; вони дуже своєрідні. І все ж можна твердити, що закони випадкових явищ існують.

Візьмемо приклад настільки простий, що кожен сам може спостерігати описувані нижче явища. Уже на цьому найпростішому прикладі легко виявити загальні закони випадку.

Уявімо собі, що ви кидаєте на стіл монету і дивитесь, яка її сторона опиниться зверху. Можливі два випадки: або монета ляже на стіл вгору гербом, або ж зверху опиниться та сторона, на якій позначена вартість монети. Кидаючи монету один раз, не можна передбачити, якою стороною вона впаде. Але якщо кидати монету сто раз підряд, то вже багато що можна сказати про те, скільки разів зверху опиниться одна і скільки друга сторона монети.

Можна впевнено твердити, що герб випаде не один і не два рази, а більше, але і не 98 чи 99 раз, а менше. Справді, адже монета зроблена дуже точно, і при киданні жодна сторона її не має переваг перед другою. Тому природно сподіватися, що приблизно в половині випадків монета випаде гербом догори і в половині випадків — вгору цифрою. Число випадань герба, таким чином, мабуть, наближатиметься до 50. Але не можна, звичайно, твердити, що це число точно дорівнюватиме 50. Однак можна з певністю передбачити, що число випадань герба міститиметься між 40 і 60. Можна перевірити це на досліді і переконатися, що завжди буває так.

Можна передбачити явище навіть ще точніше, і не буде надто сміливим заздалегідь сказати, що число випадань герба міститиметься між 43 і 57, а число випадань цифри — відповідно між 57 і 43. Але яке буде точне число випадань герба, передбачити не можна — це залежить від випадку. Проте, як ми бачили, і випадок має свої закони; в нашому прикладі він приводить до того, що число випадань герба в різних сотнях кидань змінюватиметься в межах від 43 до 57, але майже ніколи він не



може дати більше 57 або менше 43 випадань герба [1].

Візьмемо другий приклад. Ви познайомилися з хорошим стрільцем, про якого кажуть, що він дає 93% влучань. Що означає це твердження? Воно означає, що з кожних 100 пострілів, які стрілець робить по мішені, приблизно 93 кулі влучають у ціль, а близько 7 пролітають мимо. При цьому можна завбачити, що з наступних 100 пострілів, які стрілець тільки збирається зробити, вдалими будуть близько 93 пострілів; впевнено можна твердити, наприклад, що число влучань буде більше 80. (Можливо, що з часом середній процент влучань для даного стрільця зміниться — стрілець може удосконалитися в стрільбі або ж, навпаки, розучитися стріляти. Приблизно те саме можна сказати і про мисливця.)

Візьмемо третій приклад закономірності, що стосується явищ, які на перший погляд здаються цілком випадковими. Коли в сім'ї повинна народитися дитина, ніхто не може передбачити заздалегідь, чи буде це хлопчик, чи дівчинка. Якщо навіть сподіватися, що в сім'ї буде кілька дітей (скажімо, дві, три або чотири дитини), то і тут також заздалегідь не можна сказати, скільки з них буде хлопчиків. Але в усіх країнах і серед усіх народів завжди на 1000 народжених у середньому припадає 511 хлопчиків і 489 дівчаток; цю разючу сталість процента народжень хлопчиків і дівчаток відмічали багато вчених, серед яких був і один із засновників теорії імовірностей — французький математик Сімон Лаплас (1749—1827). Тому у тих випадках, коли нас цікавить число хлопчиків серед дуже великої кількості новонароджених, ми можемо з певністю передбачити це число з великим ступенем точності і ніколи не помилимося. Переглядаючи у свій час списки народжень по місту Парижу за 1745—1784 рр., Лаплас виявив, що відношення числа хлопчиків до загального числа народжень тут дорівнює приблизно 0,510, тобто трохи менше, ніж 0,511. Незважаючи на те, що різниця була дуже мала, Лаплас зробив висновок, що є якась спеціальна причина, яка збільшує число дівчаток: адже число народжень в Парижі за 39 років і в ті роки вже було дуже великим; тому навіть таке мале відхилення від звичайного відношення не можна було пояснити впливом випадку.

І дійсно, Лаплас виявив причину відхилення: вона полягала в тому, що до числа дітей, народжених у Парижі, включалися також і діти, підкинуті в спеціальний притулок — єдиний на всю Францію. Через те що французькі селяни цінили в синах майбутніх робітників, то вони частіше підкидали дівчаток, ніж хлопчиків. Виключивши підкидьків з числа тих, що народилися (багато з них у дійсності народилося не в Парижі), Лаплас дістав і для Парижу звичайне відношення числа хлопчиків до числа дівчаток. Тим самим він показав, що у випадку дуже великого числа народжень можна передбачити загальне число народжених хлопчиків з точністю до 0,1% — відхилення такого порядку можна пояснити тільки якимись спеціальними причинами.

Спробуємо тепер виразити ті закономірності, про які йшла мова, мовою математики.

Нехай є подія A, яка в кожному окремому випадку може настати або ж не настати. Нехай, далі, зроблено N випробувань, з яких у M випадках подія A настала, а в $N-M$ випадках не настала. Частота події A (тобто частка числа випробувань, в яких подія A має місце) тут дорівнює $\frac{M}{N}$. При цьому для великих N частота події виявляється приблизно сталою; так, наприклад, при спостереженні падінь кинутої монети частота $\frac{M}{N}$ випадання герба завжди наближається до $\frac{1}{2}$, а у випадку визначення статі новонароджених частота $\frac{M}{N}$ народження хлопчиків близька до 0,511. Основний закон випадкових явищ і полягає в стійкості частоти певної події при дуже великій кількості випробувань (випадків). При цьому чим більше зроблено випробувань, тим менші

[1] Точніше кажучи, можна підрахувати, що коли дуже багато разів робити по 100 кидань монети, то лише приблизно в 15% випадків число випадань герба буде більше 57 або менше 43. Цей підрахунок дає нам приклад ще тоншої закономірності, якій підлягають випадкові події.

будуть випадкові відхилення частоти від середнього її значення.

Цей закон має величезне практичне застосування в багатьох галузях народного господарства.

Можна твердити навіть, що немає жодної галузі народного господарства, в якій не застосовувалися б цей та й інші закони випадкових явищ, про які ми говоритимемо далі.

Візьмемо як ще один приклад страхування життя. Нехай який-небудь чоловік віком 55 років хоче застрахувати своє життя. Щоб знати, скільки слід взяти із застрахованого і скільки треба виплатити родичам у випадку його смерті, треба розрахувати, скільки людей у віці 55 років залишиться в живих, наприклад, через 5 або через 10 років і скільки з них помре за цей строк. Здається, що тут не можна щонебудь передбачити — адже ніхто не знає, коли він помре. Але виявляється, що при великому числі випадків можна з певністю передбачити ту кількість людей, яка залишиться в живих після 60 або 65 років.

Тому, розглядаючи всю масу застрахованих, можна зробити дуже точне передбачення — тим точніше, чим більша кількість людей охоплена страхуванням.

Аналогічно до цього можна заздалегідь розрахувати необхідне в даному місті число пожежних команд або запаси зерна, які треба мати на випадок неврожаю.

ЩО НАЗИВАЄТЬСЯ ІМОВІРНІСТЮ ПОДІЇ

Стійка частота певної випадкової події називається імовірністю цієї події. Вивчення імовірностей і законів, яким вони підлягають, становить зміст теорії імовірностей.

У деяких випадках імовірність події легко визначити заздалегідь, не роблячи жодних випробувань. Яка, наприклад, імовірність випадання герба при киданні монети? Заздалегідь ясно, що є стільки ж шансів на те, що ця подія настане, як і на те, що вона не настане. Тому імовірність настання розглядуваної події A тут дорівнює $\frac{1}{2}$. Це записують так:

$$P(A) = \frac{1}{2}.$$

Останній вираз означає, що при великому числі кидань монети герб випаде приблизно в половині всіх випадків.

А що означає вираз

$$P(A) = 0{,}003?$$

Цей вираз означає, що при великому числі випробувань розглядувана подія настане тільки в трьох випадках з тисячі.

Твердження

$$P(A) = 1$$

означає, що подія A настане обов'язково. Так, наприклад, дорівнює одиниці імовірність того, що завтра вранці зійде сонце. Навпаки, рівність $P(A) = 0$ означає, що подія A неможлива; так, наприклад, дорівнює нулеві імовірність того, що при киданні монети на стіл вона стане на ребро.

Нижче ми ознайомимося з задачами, якими займається теорія імовірностей.

Перші задачі, які будуть наведені як приклади, можуть здатися не дуже серйозними. Це — задачі про шанси на виграш при грі в кості. Однак слід мати на увазі, що теорія імовірностей почала розвиватися в XVII столітті саме при вирішенні питань, які виникали при грі в кості. Математики з цього приводу жартівливо кажуть, що безглузда гра в кості породила велику і мудру науку, дуже важливу для практичної діяльності людей, в той час як розумна гра в шахи в історії науки ніякої ролі не відіграла.

ПРИ РОЗВ'ЯЗУВАННІ ЯКИХ ЗАДАЧ ВИНИКЛА ТЕОРІЯ ІМОВІРНОСТЕЙ

Наведемо тепер деякі прості задачі з числа тих, які були розв'язані ще в XVII столітті.

Уявіть собі, що ви кидаєте на стіл гральну кість — кубик, 6 граней якого занумеровані числами від 1 до 6. Яка імовірність того, що при киданні кості на верхній грані випаде число 5?

Усіх можливостей для кості лягти на стіл тією чи іншою гранню є 6. Через те що всі грані рівноправні, то кожна з них випадатиме в одній шостій від загального числа випадків; значить,

$$P(5) = \frac{1}{6},$$

де $P(5)$ — імовірність випадання п'ятірки.

Яка імовірність того, що при киданні кості випаде парне число очок? Сприятливих можливостей тут буде 3: випадання чисел 2, 4, 6. Тому

$$P_{(\text{парн.})} = \frac{3}{6} = \frac{1}{2}.$$

Яка імовірність одночасного випадання числа 5 на двох костях?

При киданні двох костей ми матимемо 36 можливих випадків: (1, 1), (1, 2), (1, 3), ..., (1, 6), (2, 1), (2, 2), ..., (2, 6) і т. д. до (6, 1), (6, 2),..., (6, 6) (тут перша цифра вказує число очок, що випало на першій кості, а друга — на другій кості). Всі ці випадки цілком рівноправні; тому

$$P(5, 5) = \frac{1}{36}.$$

Зауважимо ще, що, як виявилося,

$$P(5, 5) = P(5) \cdot P(5).$$

Це співвідношення є окремим випадком важливої теореми множення імовірностей, на якій, проте, ми тут не можемо затримуватися.

Яка імовірність того, що сума числа очок, які випали при киданні двох костей, дорівнюватиме 8?

Складемо таблицю тих випадків, при яких сума очок дорівнюватиме 8. Це будуть випадки:

(2, 6), (3, 5), (4, 4), (5, 3) і (6, 2).

Таким чином, ми бачимо, що є всього п'ять комбінацій, які сприяють нашій умові. Але кожна окрема комбінація реалізується, як ми встановили при розв'язуванні попередньої задачі, приблизно в $\frac{1}{36}$ частині всіх кидань; тому умова рівності суми очок числу 8 виконуватиметься приблизно в п'яти випадках з кожних 36 кидань. Отже, шукана імовірність тут дорівнює $\frac{5}{36}$.

Подамо тепер один трохи складніший історичний приклад, що показує, як у XVII ст. практичні потреби гравців у кості допомагали розвиткові теорії імовірностей, тобто, у кінцевому підсумку, допомагали науково ставити питання про закони випадку.

Один французький рицар, кавалер де Мере, був пристрасним гравцем у кості. Він всіляко намагався розбагатіти за допомогою гри і для цього вигадував різні ускладнені правила, які, як йому здавалося, приведуть його до мети. У той час прагнення розбагатіти за допомогою азартних ігор охоплювало, як хвороба, багатьох людей.

Де Мере вигадав, зокрема, такі правила гри. Він пропонував кинути одну кість чотири рази підряд і закладався, що при цьому хоч би один раз випаде цифра 6; якщо ж цього не траплялося — ні разу не випадало 6 очок, то вигравав його противник. Точне значення імовірності того, що в цих умовах випаде 6, в той час було невідоме, хоч було видно, що воно близьке до $\frac{1}{2}$. Де Мере гадав, що він буде частіше вигравати, ніж програвати, але все ж звернувся до свого знайомого, одного з видатних математиків XVII ст.— Блеза Паскаля (1623—1662) з просьбою розрахувати, яка імовірність виграшу у вигаданій ним грі.

Наведемо розрахунок Паскаля.

При кожному окремому киданні імовірність випадання 6 дорівнює $\frac{1}{6}$. Імовірність же того, що не випаде 6 очок, дорівнює $\frac{5}{6}$.

Далі, нехай ми кинемо кість двічі. Повторимо спробу, яка полягає у дворазовому киданні кості, багато разів, скажімо, N разів. Тоді приблизно в $\frac{5}{6}$ з цих N випадків на кості, кинутій вперше, не випаде 6. З числа цих $\frac{5}{6} \cdot N$ випадків приблизно в $\frac{5}{6}$, тобто всього в $\frac{5}{6}\left(\frac{5}{6}N\right) = \left(\frac{5}{6}\right)^2 \cdot N$ випадків не випаде 6 і при другому киданні кості. Таким чином, імовірність того, що при дворазовому киданні кості ні разу не випаде 6 очок, дорівнює

$$\left(\frac{5}{6}\right)^2 = \frac{25}{36}.$$

Так само виявляється, що імовірність того, що ні разу не випаде 6 при триразовому киданні кості, дорівнює

$$\left(\frac{5}{6}\right)^3 = \frac{125}{216}.$$

Нарешті, імовірність того, що при чотиразовому киданні жодного разу не випаде 6, дорівнює

$$\left(\frac{5}{6}\right)^4 = \frac{625}{1296}.$$

Таким чином, для рицаря де Мере імовірність програшу дорівнювала

$$\frac{625}{1296}, \text{ тобто менше } \frac{1}{2};$$

отже, імовірність виграшу була більша від половини. Значить, при кожній грі більше від половини шансів було за те, що рицар виграє; при багаторазовому ж повторенні гри він майже напевно був у виграшу.

Дійсно, чим більше рицар грав, тим більше він вигравав. Кавалер де Мере був дуже задоволений і вирішив, що він відкрив вірний спосіб збагачення. Однак поступово іншим гравцям стало ясно, що ця гра для них невигідна, і вони перестали грати з де Мере. Треба було вигадувати якісь нові правила, і де Мере вигадав нову гру. Він запропонував кидати дві кості 24 рази і закладався, що зверху, хоч би один раз, будуть дві п'ятірки. Де Мере вважав, що і в цій грі він частіше вигравatиме, ніж програватиме.

Але цього разу рицар помилився. Імовірність одночасного випадання двох п'ятірок при киданні двох костей дорівнює, як ми знаємо, $\frac{1}{36}$; тому імовірність того, що не випадуть дві п'ятірки, дорівнює $\frac{35}{36}$. Імовірність того, що при 24-разовому киданні двох костей ні разу не випадуть дві п'ятірки, дорівнює відповідно

$$\left(\frac{35}{36}\right)^{24}, \text{ що більше } \frac{1}{2}.$$

Отже, для рицаря імовірність програшу була більша від половини. Це означало, що чим більше рицар гратиме, тим більше він програватиме. Так і сталося. Чим більше він грав, тим більше розорявся і кінець кінцем став злидарем.

Найцікавіше в цьому історичному анекдоті те, що завдяки таким своєрідним «практичним запитам» з'явилася теорія розрахунку випадкових явищ. У XVII і XVIII століттях вчені розглядали ці приклади як «забавні випадки» застосування математичних знань до явищ, які не мають значного поширення. Адже гравець у кості, який мріє про багатство, ніяк не заслуговує, щоб на допомогу йому була створена спеціальна наука.

ЯКІ ЗАДАЧІ РОЗВ'ЯЗУВАЛИ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ ІМОВІРНОСТЕЙ ПІД ЧАС ВІЙНИ

Але виявилося, що галузь застосувань теорії імовірностей надзвичайно широка. Теорія імовірностей займається вивченням усіх масових явищ, тобто всіх часто повторюваних випадків, хоч би в якій галузі життя, науки або техніки вони зустрічалися.

Наведемо приклад з воєнної галузі. Добре відомо, що дуже важко, майже неможливо, збити літака пострілом з гвинтівки. Адже стрілець повинен не тільки влучити у літак, а й поцілити у вразливе місце. Тому імовірність того, що літака буде збито поодиноким пострілом з гвинтівки, абсолютно мізерна — в кожному окремому випадку стрілець майже напевно не поцілить у літака. Зовсім інакше стоїть справа при масовому обстрілі. Теорія імовірностей допомагає розрахувати, скільки треба зробити одночасних пострілів по літаку противника для того, щоб можна було сподіватися збити літака.

Покажемо приклади цього розрахунку. Припустимо, що імовірність збити літака одним пострілом дорівнює 0,004; інакше кажучи, імовірність того, що стрілець не поцілить у літак, дорівнює 0,996. Стрілець може стріляти у літак дуже багато разів і все-таки має дуже мало шансів поцілити в нього.

Припустимо тепер, що по літаку одночасно стріляють 500 стрільців. Імовірність того, що жоден з 500 стрільців не уразить літака, можна обчислити за формулою

$$(0{,}996)^{500}$$

(порівняйте з розрахунками програшу в двох іграх кавалера де Мере). З допомогою таблиць логарифмів можна виявити, що

$$(0{,}996)^{500} \approx 0{,}14.$$

Таким чином, імовірність того, що ні один з 500 одночасних гвинтівкових пострілів не поцілить у літак, становить всього 0,14. Інакше кажучи, імовірність поцілляння в літак, імовірність того, що літака буде збито, дорівнює

0,86. Можна сказати, що літака майже напевно буде збито залпом з 500 пострілів; у нього набагато менше шансів утекти цілим з-під такого обстрілу, ніж шансів загинути.

Насправді імовірність поцілляння окремим стрільцем у літак звичайно менша, ніж 0,004; частіше її слід вважати близькою до 0,001. Однак і в цьому випадку імовірність збити літака залпом з 500 пострілів дорівнює 0,54, тобто є більше шансів збити літака, ніж не збити.

Теорія імовірностей використовувалася під час останньої війни також для визначення найдоцільніших методів розшуків літаків або підводних човнів противника або для указання шляхів, що дозволяють ухилитися від зустрічі з ними. Типовою тут є, наприклад, задача про те, як найвигідніше вести каравани торгових суден по океану, в якому діють ворожі підводні човни. Якщо організовувати каравани з великого числа суден, то можна буде обійтися меншим числом караванів, завдяки чому імовірність зустрічі з підводним човном противника стає меншою; проте при цьому збільшується шкода, якої може завдати така зустріч. Методи теорії імовірностей допомогли розрахувати найбільш сприятливий режим судноплавства в воєнних умовах, тобто найвигідніші розміри караванів та частоти їх відправляння. Задач такого роду виникало настільки багато, що при військовому командуванні довелося створити спеціальні групи, які займалися розрахунками, пов'язаними з теорією імовірностей. Такі розрахунки після війни почали застосовуватися і при вирішенні багатьох господарських питань мирного часу; вони становили зміст нового великого напряму, названого дослідженням операцій, який на наших очах оформляється в самостійну науку.

КІЛЬКА СЛІВ ПРО ІСТОРІЮ РОЗВИТКУ ТЕОРІЇ ІМОВІРНОСТЕЙ

У XVII ст. теорією імовірностей займалися такі видатні математики, як французи Б. Паскаль і П. Ферма та голландець Х. Гюйгенс. При цьому перші вклади в теорію імовірностей були зроблені, як ми вже зазначали, у зв'язку з вивченням азартних ігор.

Однак уже наприкінці XVII ст. почали користуватися теорією імовірностей при страхуванні кораблів від випадковостей, тобто почали підраховувати, скільки шансів на те, що корабель повернеться у порт непошкодженим, що він не буде потоплений бурею, не буде захоплений піратами, що вантаж на ньому не підмокне, не згорить, не згниє і т. п. Такий розрахунок давав змогу визначити, яку страхову премію слід виплачувати власникові корабля або власникові вантажу в тому випадку, якщо корабель не повернеться в порт або якщо вантаж зіпсується, щоб це було вигідно власникові страхової контори.

У першій половині XVIII ст. для розвитку теорії імовірностей дуже багато зробив швейцарець Яків Бернуллі — член Російської Академії наук. Слідом за ним треба назвати французьких академіків П. С. Лапласа і С. Д. Пуассона та видатного німецького математика К. Ф. Гаусса, які працювали наприкінці XVIII і на початку XIX століть.

При всьому тому протягом другої половини XVIII ст. і першої половини XIX ст. теорія імовірностей в певному розумінні «тупцювала на місці»,— в той час ще не був ясний зв'язок між різними явищами життя та наукою про масові явища. В середині XIX ст. дуже велике зрушення в теорії імовірностей зробили праці знаменитого російського математика П. Л. Чебишева. Він знайшов деякі нові методи розв'язування раніше поставлених задач і зумів створити навколо себе велику групу молодих учених, з яких деякі згодом досягли світової слави. Насамперед слід згадати А. А. Маркова,

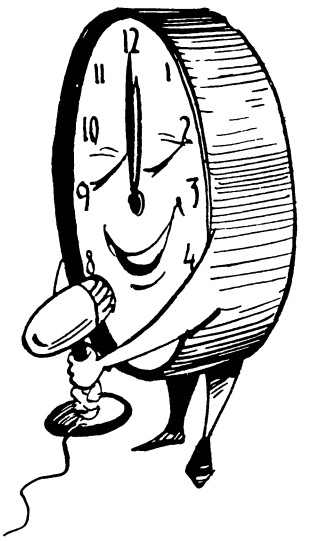
О. М. Ляпунова; дещо пізніше розгорнув свою діяльність академік С. Н. Бернштейн — наш сучасник, який працює і нині. Радянська школа теорії імовірностей, очолювана академіком А. М. Колмогоровим, підтримує традиції дореволюційної російської математики — вона безперечно стоїть на одному з перших місць у світовій науці.

ЯКІ ЗАДАЧІ РОЗВ'ЯЗУЮТЬ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ ІМОВІРНОСТЕЙ У НАШ ЧАС

Поступово в XIX ст. багато фізиків прийшли до тієї точки зору, що висновки теорії імовірностей можуть бути застосовані і до фізичних явищ. У другій половині XIX ст. в працях англійця К. Максвелла, австрійця Л. Больцмана та американця Д. В. Гіббса зародилася так звана «статистична фізика», що являє собою галузь фізики, яка спеціально вивчає величезні сукупності атомів та молекул, з яких складається будь-яка речовина, з точки зору теорії імовірностей.

З середини XIX ст. вчення про імовірності розвивалося з величезною швидкістю, завойовуючи чимраз нові і нові галузі застосування. Сама наука про випадкове дістала нове висвітлення. В міру того як масові випадкові явища вивчалися дедалі глибше, відкривалися і нові закони випадку.

Практичне значення теорії імовірностей — тієї вітки математики, яка вивчає масові явища, з кожним роком стає чимраз більше. Останнім часом теорія імовірностей знайшла, наприклад, важливі застосування в астрономії. Значення теорії імовірностей для астрономії дуже зросло з того часу, як астрономи почали вивчати не тільки окремі планети та зорі, а й цілі маси зір — зоряні скупчення, а також позагалактичні туманності, або галактики, що складаються з надзвичайно великої кількості окремих зір. За останній час в астрономії почав розвиватися також напрям, що вивчає методами теорії імовірностей усю масу галактик, подібних до тієї величезної зоряної системи, до якої належить наше Сонце з усіма планетами; величезне число галактик у Всесвіті дозволяє підходити до них з методами, що належать до масових явищ.



Звільнення атомної енергії, створення атомних бомб, а потім і атомних електростанцій, атомних двигунів і т. д. поставили нові серйозні завдання перед теорією імовірностей. У будь-якій атомній установці основну роль відіграють ядерні реакції — процеси поділу або злиття атомних ядер, спричинювані їх випадковими зіткненнями з найдрібнішими елементарними частинками (насамперед нейтронами) і однієї з одною. При цьому надзвичайно важливо заздалегідь точно розрахувати перебіг усіх процесів в установці — найменша помилка може призвести до грандіозної катастрофи. І тут на допомогу приходить теорія імовірностей — незважаючи на випадковий характер окремих атомних зіткнень, вона дозволяє з величезною точністю визначити, як відбуватимуться зміни в усій масі атомів.

Кустарне виробництво має тепер скрізь дуже мале значення; навпаки, значення масового виробництва дедалі зростає. Тому зростає важливість для промисловості теорії масових явищ, що дозволяє науково обгрунтовано вести виробництво. Потрібні науково обгрунтовані методи контролю якості виробів, методи визначення частки бракованих виробів на основі спостережень лише невеликої частини їх. Немає жодного заводу, який не потребував би використання висновків теорії імовірностей.

При цьому окремий завод часто не спроможний вирішити ті проблеми наукового підходу до явищ, які виникають в його практиці. Над створенням загальної теорії масових явищ, які охоплюють величезну кількість конкретних завдань, що виникають на виробництві, працюють математики — спеціалісти з теорії імовірностей.

Тепер майже всі галузі масового виробництва застосовують висновки теорії імовірностей.

Кожен з нас користується автоматичним телефоном. Можливість обладнання автоматичних телефонних станцій обгрунтована теорією імовірностей. Для того щоб пояснити роль теорії імовірностей в телефонії, спинимося на одному досить спеціальному прикладі.

Багато хто з вас звертався до «говорящого годинника» — автоматичного пристрою на телефонній станції, який швидко відповідає вам, котра година. Теорія імовірностей дозволила розрахувати приблизне число людей, які одночасно звертаються до «говорящого годинника», щоб дізнатися, котра година. І хоч людей, які в будь-яку хвилину і навіть секунду можуть поцікавитися по телефону, котра година, в місті дуже багато, біля «говорящого годинника» практично ніколи не буває «черги»; коли до нього не звернешся — завжди телефон вільний. Це пояснюється тим, що теорія імовірностей дає змогу зробити розрахунок, скільки людей і в який час звертатимуться за довідкою. Виходячи з цього, можна визначити мінімальну кількість комплектів автоматичних апаратів, потрібну для того, щоб задовольнити потреби мільйонів жителів міста.

ТЕОРІЯ ІМОВІРНОСТЕЙ І ТЕОРІЯ ІНФОРМАЦІЇ

Роль теорії імовірностей для практики особливо бурхливо зростає в наші дні. Виникають нові великі розділи теорії імовірностей, які відразу ж знаходять численні застосування. Цілком очевидно, що незабаром жоден добрий інженер не зможе обійтися без знання цієї науки; в майбутньому ж знання теорії імовірностей стане необхідним для всякої освіченої людини. В нашій країні весь час збільшується кількість технічних учбових закладів, в яких вивчається теорія імовірностей, а в деяких інших країнах, наприклад в Японії, елементи теорії імовірностей уже введені в програму середньої школи.

Вище ми вже згадували про один дуже важливий новий напрям у науці, тісно пов'язаний з теорією імовірностей,— про так зване дослідження операцій. На закінчення спинимося ще на одному зовсім молодому, але дуже важливому розділі теорії імовірностей — на так званій теорії інформації.

Теорія імовірностей займається випадковими подіями, результат яких заздалегідь нам не відомий. Тому з'ясування того, який результат мала якась з таких подій, дещо збільшує наші знання, або, як звичайно кажуть, дає нам якусь нову інформацію. При цьому очевидно, що в різних випадках збільшення наших знань буде цілком різним: знання того, якою стороною лягла на стіл монета при одноразовому киданні, менше від знання результатів двох кидань тієї ж монети, а знання того, чи випаде сніг у Москві до жовтневих свят, слід вважати набагато ціннішим, ніж знання того, чи випаде сніг до зимових канікул; в останньому ми можемо бути цілком впевнені без усякої перевірки. В 1947—1948 рр. талановитий американський математик і інженер Клод Шеннон вказав метод, який дозволяє чисельно виміряти «кількість інформації», що міститься у з'ясуванні результату того чи іншого досліду з випадковим наслідком, що відразу ж виявилося дуже корисним для багатьох завдань природознавства і техніки.

Безпосередньо роботи Шеннона були пов'язані з питаннями телеграфії. Телеграфний апарат служить для передачі певної інформації; при цьому природно поставити питання про те, як передавати цю інформацію найбільш економним способом. Добре відомо, що часто передача провадиться з допомогою так званої азбуки Морзе, згідно з якою букви передаються певними комбінаціями крапок і тире; так, наприклад, буква «е» за азбукою Морзе зображається однією крапкою «.», а буква «ш» — чотирма тире «— — — —». Легко пояснити, чому запис букви «е» за азбукою Морзе зроблений коротшим, ніж запис букви «ш»: дійсно, в передачі перша буква зустрічається набагато частіше від другої, і тому для неї набагато важливіше мати коротке позначення. Таким чином, вже при створенні азбуки Морзе були враховані неоднакові імовірності появи в повідомленні різних букв — ця обставина і була використана для того, щоб зробити запис передаваних за допомогою цієї азбуки повідомлень якнайкоротшим. Ще більший ефект можна мати,

коли враховувати ту обставину, що імовірність кожної букви в повідомленні істотно залежить від переданої перед нею букви. Справді, якщо в передачі російською мовою попередня буква була голосна, то імовірність приголосної різко підвищується, а якщо попередня буква була «ч», то майже напевно наступною буде «и», «е» або «т» (як у слові «что»). Такі розрахунки, які безпосередньо стосуються теорії імовірностей, проводив ще у свій час видатний російський математик А. А. Марков, який старанно проаналізував з цією метою уривки з «Євгенія Онєгіна» та інших творів класичної російської літератури. Шеннон зв'язав ці розрахунки із загальним питанням про «кількість інформації», яку можна передати по телеграфу за одиницю часу, і вивів звідси практичні правила, що дозволяють вказати найвигідніші прийоми передачі повідомлень.

У дальшому вказана Шенноном можливість чисельної оцінки «кількості інформації» виявилась дуже цінною не тільки для вузьких цілей телеграфії, а й в усіх тих випадках, коли ми маємо справу з якою б то не було передачею чи нагромадженням певних знань. Тут мова може йти і про автоматичне регулювання руху поїздів, і про сучасні математичні машини, які самостійно розв'язують задані їм найскладніші задачі, і про передачу нервовими волокнами людини певних сигналів, які йдуть від органів чуття до кори головного мозку та назад — від головного мозку до мускулів. Тепер теорія інформації служить основним математичним апаратом к і б е р н е т и к и — великого напряму, що об'єднує ряд наук та вивчає широке коло явищ, які стосуються техніки, фізики, біології, економіки.

Довідковий відділ

Що читати з математики

Читач, який зацікавився проблемами, про які розповідалося в статтях цього розділу 3-го тома Дитячої енциклопедії, може поглибити і розширити свої знання, звернувшись до великої науково-популярної літератури з математики. Тут ми даємо короткий перелік рекомендованої літератури.

До вступної статті «Кілька слів про математику» тісно примикає брошура:

Колмогоров А. Н. О профессии математика, изд. 2-е, изд-во МГУ, 1952.

У цій брошурі, написаній одним з видатних радянських математиків, розповідається про те, чим займаються математики-дослідники і в чому полягають так звані математичні здібності.

До розділу «Числа» можна рекомендувати таку літературу:

Стаття Башмакової І. Г. «Происхождение систем счисления», вміщена в «Энциклопедии элементарной математики», т. I, изд-во АПН РСФСР, 1951.

У цій статті розповідається про походження різних систем числення і способів нумерації чисел у різних народів з стародавніх часів до наших днів.

Гельфонд А. О. Решение уравнений в целых числах, Гостехиздат, 1952.

Книга розповідає про розв'язування неозначених рівнянь як першого степеня, так і вищих степенів.

Про прості числа і зв'язані з ними проблеми можна прочитати в книзі:

Шнирельман Л. Г. Простые числа, Гостехиздат, 1940.

Слід зауважити, проте, що ця книга хоч і передбачає у читача знання математики в обсязі середньої школи (крім останнього розділу, де використовуються основи математичного аналізу), все ж написана дуже важко. Простіший виклад ряду проблем, зв'язаних з простими числами та іншими питаннями арифметики, можна знайти в книгах:

Берман Г. Н. Число і наука про нього, вид-во «Радянська школа», К., 1950.

Трост Э Простые числа, Физматгиз, 1954.

Ряд цікавих нарисів про властивості чисел є в книгах:

Радемахер Г и Теплиц О. Числа и фигуры, Гостехиздат, 1935.

Депман І. Я. Розповіді про математику, вид-во «Радянська школа», К., 1957.

З теорії чисел цікаві також такі книги:

Хинчин А. Я. Три жемчужины теории чисел, Гостехиздат, 1947.

У цій книзі викладається розв'язання трьох важких проблем теорії чисел, які завдали у свій час чимало клопоту математикам, що намагалися їх розв'язати.

Хинчин А. Я. Великая теорема Ферма, ОНТИ, 1934.

У цій книзі розповідається історія спроб розв'язати велику проблему Ферма про те, чи має рівняння $x^n + y^n = z^n$ розв'язки в цілих додатних числах Ця проблема не вирішена повністю й досі. В книзі дається вирішення її окремих випадків

Хинчин А Я. Цепные дроби, изд. 2-е, Гостехиздат, 1936

У цій книзі викладається теорія ланцюгових дробів. Ця теорія цілком доступна школяреві старших класів. Її елементи є в додатку до шкільного підручника алгебри А. П. Кисельова. Ця теорія має великі теоретичні і технічні застосування.

Курант Р и Роббинс Г. Что такое математика. Элементарный очерк идей и методов, Гостехиздат, 1947.

До розділу «Культура лічби і наближені обчислення» рекомендуємо таку літературу:

Стаття Брадіса В. М. «Устный счет и письменный счет. Вспомогательные средства вычислений», вміщена в «Энциклопедии элементарной математики», т. I, изд-во АПН РСФСР, 1951.

У цій статті розповідається про раціональні правила усних, письмових та інструментальних обчислень.

Депман И. Я. Рассказы о решении задач, Детгиз, Л., 1957.

Книга про розв'язування арифметичних задач на практиці. Містить багато коротких історичних відомостей про великих математиків і задачі, які вони розв'язували.

Тукачинский М. С. Как считают машины, Гостехиздат, 1955.

У доступній формі автор викладає основні принципи роботи лічильних машин. Цій же темі присвячена інша книжка того ж автора:

Тукачинский М. С. Машины-математики, Гостехиздат, 1958.

Більш детальний опис принципів будови і роботи різних обчислювальних машин є в книгах:

Делоне Б. Н. Краткий курс математических машин, ч. 1, Гостехиздат, 1952.

Хренов Л. С. Малые вычислительные машины, изд. 2-е, Физматгиз, 1958.

Про будову лічильної логарифмічної лінійки і про те, як з нею працювати, розповідається в книзі:

Панов Д. Ю. Счетная линейка, изд. 13-е, Физматгиз, 1958.

Про елементи номографії та її застосування є книга:

Пентковский М. В. Считающие чертежи, Гостехиздат, 1953.

З розділу «Фігури і тіла» рекомендуємо такі книги:

Александров П. С. Н. И. Лобачевский, Гостехиздат, 1944.

У цій книзі є дві статті. Одна з них присвячена біографії великого математика Миколи Івановича Лобачевського, а друга стаття викладає основи неевклідової геометрії Лобачевського. Друга стаття видана також окремою брошурою:

Александров П. С. Что такое геометрия Лобачевского, Гостехиздат, 1954.

Неевклідовим геометріям присвячена також популярна книга:

Каган В. Ф. Лобачевский и его геометрия (общедоступные очерки), Гостехиздат, 1955.

Широков П. А. Краткий очерк основ геометрии Лобачевского, Гостехиздат, 1955.

Польский Н. И. О различных геометриях, К., 1957.

Матеріал, що є в статті «Геометрія навколо нас», розширює брошура:

Маркушевич А. И. Замечательные кривые, Гостехиздат, 1952.

Про деякі просторові криві лінії можна прочитати в книгах:

Люстерник Л. А. Кратчайшие линии, Гостехиздат, 1955.

Пархоменко А. С. Что такое линия, Гостехиздат, 1954.

Болтянский В. Г. Равновеликие и равносоставленные фигуры, Гостехиздат, 1956.

У книзі розглядаються питання розбивання рівновеликих фігур і тіл на частини.

Штейнгауз Г. Математический калейдоскоп, Гостехиздат, 1949.

У цій книзі зібрано багато яскравих математичних фактів, наведених без доведень, але з чудовими ілюстраціями, взятими з життя.

З геометрії можна рекомендувати також такі книги:

Смогоржевський О. С. Метод координат, вид-во «Радянська школа», К., 1959.

Ця книга примикає за змістом до статті «Що таке координати і для чого вони служать».

Дубнов Я. С. Ошибки в геометрических доказательствах, Гостехиздат, 1953.

У цій книзі розповідається про типові помилки, які допускають учні в геометричних міркуваннях, а також розповідається про так звані софізми, тобто про такі «доведення», де в замаскованому вигляді зустрічається логічна помилка.

Фетисов А. И. О доказательствах в геометрии, Гостехиздат, 1954.

Ця книга, так само як і попередня, сприяє розвиткові правильного, логічного мислення, необхідного для успішних занять математикою.

Лопшиц А. М. Вычисление площадей ориентированных фигур, Гостехиздат, 1956.

Книга ознайомлює читача з поняттям площі орієнтованої фігури і з його застосуваннями до теорії планіметра та до вимірювання площі земельної ділянки.

Головина Л. И. и Яглом И. М. Индукция геометрии, Гостехиздат, 1956.

Книга присвячена різноманітним застосуванням методу математичної індукції до розв'язання геометричних задач.

Про вектори на площині в популярній формі розповідається в книзі:

Фишман, Векторы на плоскости, Гостехиздат, 1940.

Різні цікаві геометричні питання розглядаються в книгах:

Зетель С. И. Геометрия линейки и геометрия циркуля, изд. 2-е, Учпедгиз, 1957.

Зетель С. И. Новая геометрия треугольника, Учпедгиз, 1940.

Люстерник Л. А. Выпуклые тела и многогранники, изд. 3-е, Гостехиздат, 1955.

Кордемский Б. А. и Русалев Н. В. Удивительный квадрат, Гостехиздат, 1952.

Для більш докладного ознайомлення з основами диференціального числення можна звернутися до книги:

Болтянский В. Г. Что такое дифференцирование, Гостехиздат, 1955.

У цій книзі дається поняття похідної функції і розповідається про її застосування.

Про основні ідеї, які лежать в основі інтегрального числення, ви прочитаєте в книгах:

Натансон И. П. Суммирование бесконечно малых величин, Гостехиздат, 1953.

Маркушевич А. И. Площади и логарифмы, Гостехиздат, 1952.

Про розв'язування задач на знаходження мінімумів і максимумів можна прочитати в таких книгах:

Натансон И. П. Простейшие задачи на максимум и минимум, Гостехиздат, 1950.

Зетель С. И. Задачи на максимум и минимум, Гостехиздат, 1948.

З розділу «Рівняння і функції» рекомендуємо популярну книгу:

Маркушевич А. И. Ряды, Гостехиздат, 1957.

Шерватов В. Г. Гиперболические функции, Гостехиздат, 1954.

З розділу «Алгебра скінченного і нескінченного» вкажемо таку популярну літературу:

Баумгартнер Л. Теория групп, ОНТИ, 1934.

У цій книзі популярно викладені основи теорії груп. Цій же темі присвячена книга:

Александров П. С. Вступ до теорії груп, вид-во «Радянська школа», К., 1955.

Про розв'язність рівнянь у радикалах і про питання, близькі до цієї великої проблеми, можна прочитати в книгах:

Окунев Л. Я. Проблема резольвент Чеботарева, Гостехиздат, 1949.

Школьник А. Г. Двучленные уравнения и задачи деления круга, Учпедгиз, 1940.

Курош А. Г. Алгебраические уравнения произвольных степеней, Гостехиздат, 1951.

Про життя і роботу над створенням теорії розв'язності рівнянь у радикалах геніального французького математика Е. Галуа можна прочитати в книзі, написаній видатним польським фізиком Леопольдом Інфельдом:

Инфельд Л. Эварист Галуа — избранник богов, «Молодая гвардия», 1959.

Про один метод наближеного розв'язування рівнянь довільних степенів в доступній формі розповідається в брошурі:

Шафаревич И. Р. О решении уравнений высших степеней (метод Штурма), Гостехиздат, 1954.

Рекомендуємо також книги:

Дынкин Е. Б. и Успенский В. А. Математические беседы, Гостехиздат, 1952.

Яглом И. М. Геометрические преобразования, т. I и II, Гостехиздат, 1955—1956.

Кузьмин О. Р. и Фаддеев А. Д. Алгебра и арифметика комплексных чисел, Гостехиздат, 1950.

З математичної логіки, а також з близьких до неї питань, пов'язаних з алгоритмами та кібернетикою, рекомендуємо книги:

Кобринский Н. Е., Пекелис В. Д., Быстрее мысли, изд-во «Молодая гвардия», 1959.

Трахтенберг Б. А. Алгоритмы и машинное решение задач, Гостехиздат, 1957.

Градштейн И. С. Прямая и обратная теоремы, изд. 2-е, Гостехиздат, 1950.

Полетаев И. А. Сигнал, изд-во «Советское радио», М., 1958.

З основами теорії імовірностей можна ознайомитися з книги:

Гнеденко Б. В. и Хинчин А. Я. Элементарное введение в теорию вероятностей, изд. 2-е, Гостехиздат, 1950.

Деякі питання історії математики розглянуті в книгах:

Гнеденко Б. В. Очерки по истории математики в России, Гостехиздат, 1948.

Люди русской науки, Гостехиздат, 1950.

Вахтин Б. М. Великий русский математик Н. И. Лобачевский, Учпедгиз, 1956.

Депман И. Я. Возникновение системы мер и способов измерения величин, Учпедгиз, 1956.

Кольман Э. Бернард Больцано (1781—1848), изд-во Академии наук СССР, 1955.

Лурье С. Я. Архимед, изд-во Академии наук СССР, 1945.

Марков Н. И. Лобачевский — великий русский ученый, изд-во «Знание», М., 1956.

Цейтен Г. Г. История математики в древности и в средние века, ОНТИ, М.—Л., 1938.

Цейтен Г. Г. История математики в XVI и XVII вв., ОНТИ, М.—Л., 1938.

Книги для позакласного читання з математики, присвячені різним питанням цієї науки:

Депман И. Я. Метод математической индукции, Учпедгиз, Л., 1957.

Соминский И. С. Метод математической индукции, Гостехиздат, 1956.

Дубнов Я. С. Ошибки в геометрических доказательствах, Гостехиздат, 1955.

Колосов А. А. Книга для внеклассного чтения по математике для учащихся VIII класса, Учпедгиз, 1958.

У цій книзі читач знайде додатковий матеріал до того, про що він довідався на уроці. Розповідається, як застосувати на практиці знання, здобуті на уроках математики, дається історичний мате-

ріал. У кінці кожного розділу є список літератури, яка допоможе розширити математичний кругозір учня.

Коровкин П. П. Неравенства, Гостехиздат, 1956.

Маркушевич А. И. Комплексные числа и конформные отображения, Гостехиздат, 1954.

Миракьян Г. М. Прямой круговой цилиндр, Гостехиздат, 1955.

Нагибін Ф. Ф. Математична шкатулка, вид-во «Радянська школа», К., 1961.

Книга знайомить юного читача з біографіями видатних радянських і російських математиків. Вона містить цікавий матеріал з історії математики, усної лічби; даються поняття про графіки, «палички Непера», лічильні прилади та машини і про математичну логіку. В книзі багато матеріалу, який школяр може використати на практиці: про вимірювання на рисунку і на місцевості,— а також багато задач і вправ до кожного розділу.

У перелічених вище книгах викладаються в основному різні питання математичної теорії. Нижче подається список книг, де читач знайде велику кількість цікавих математичних задач і прикладів практичного застосування математики.

Кордемський Б. А. Математична кмітливість, вид-во «Радянська школа», К., 1959.

Люстерник Л. А. Кратчайшие линии. Вариационные задачи, Гостехиздат, 1955.

Манзон Б. А. Сборник занимательных математических задач, игр и головоломок, Крымиздат, 1954.

Перельман Я. И. Занимательная арифметика. Загадки и диковинки в мире чисел, Детгиз, М., 1954.

Перельман Я. И. Занимательная алгебра, Гостехиздат, 1956.

Перельман Я. И. Занимательная геометрия, Гостехиздат, 1955.

Перельман Я. И. Живая математика, Физматгиз, 1959.

Перельман Я. И. Занимательные задачи, изд-во «Молодая гвардия», М., 1934.

Перельман Я. И. Вычисления с приближенными числами, изд-во АПН РСФСР, 1957.

Рымарев А. Ф. Сборник задач для внеклассных занятий по математике в V, VI классах средней школы, Учпедгиз БССР, 1957.

Шклярский Д. О., Ченцов Н. Н., Яглом И. М. Избранные задачи и теоремы элементарной математики, ч. I. Арифметика и алгебра, Гостехиздат, 1954.

Яглом А. М. и Яглом И. М. Неэлементарные задачи в элементарном изложении, Гостехиздат, 1954.

Покажчик імен і предметів

Абак — лічильна дошка, що вживалася в Стародавньому Римі і Стародавній Греції — 30, 56.

Абель, Нільс Генрік (1802—1829) — норвезький учений, один з найбільш видатних математиків першої половини XIX ст. Відомий працями в галузі алгебри, інтегрального числення і теорії рядів — 123.

Адамс, Джон Кауч (1819—1892) — англійський астроном і математик. Професор астрономії в Кембріджському університеті. Відомий відкриттям планети Нептун на основі математичного аналізу неправильностей у русі планети Уран — 171.

Аксіома — твердження, яке приймається без доведення. На основі аксіом за правилами математичної логіки доводяться теореми —92, 108.

Аксіома Лобачевського — через точку поза прямою у даній площині можна провести не менше двох прямих, що не перетинають дану пряму. Аксіома Лобачевського не виконується в геометрії Евкліда —114.

Алгебра — одна з найстаріших математичних дисциплін, що виникла із задач, які приводять до розв'язання рівнянь — 185.

Алгебраїчно замкнене поле — поле, до якого належать всі корені многочленів з коефіцієнтами з цього поля — 190.

Алгебраїчне число — корінь многочлена з цілочисловими коефіцієнтами — 189.

Алфавітні нумерації — такі способи запису чисел, в яких вживаються не цифрові знаки, а букви алфавіту. Наприклад, на Русі в давні часи користувалися слов'янською нумерацією — 34.

Ал-Хорезмі, Мухаммед ібн-Муса (IX ст.) — середньоазіатський учений, автор визначної книги з математики. Від першого слова «алджебр» із заголовку цієї книги походить слово «алгебра» — 121, 122.

Аполлоній — старогрецький математик, який жив близько 200 р. до н. е. Найважливішою працею Аполлонія є його «Конічні перерізи» — 22, 40.

Арифметика — одна з найстаріших математичних дисциплін, що вивчає основні властивості чисел та дій над ними — 195.

Арістотель (384—322 рр. до н. е.) — видатний старогрецький учений, творець науки логіки— 91.

Архімед (близько 287—212 рр. до н. е.)—найвидатніший математик і механік давнини. Відомий працями в різних галузях науки — 22, 35.

Асоціативність (сполучність) — властивість деяких математичних операцій. Наприклад, закон асоціативності додавання має вигляд: $(a + b) + c = a + (b + c)$ — 191, 192.

Бернсайд, Уільям (1852—1927) — англійський математик-алгебраїст, професор Морського коледжу в Гріннвічі. Основні праці належать до теорії груп — 195.

Бернуллі, Яків (1654—1705) — видатний швейцарський математик, який зробив надзвичайно важливі відкриття в теорії імовірностей, в математичному аналізі та інших галузях математики і фізики — 217.

Бернштейн, Сергій Натанович (народ. 1880) — радянський математик, академік. Основні праці стосуються диференціальних рівнянь, теорії наближень функцій і теорії імовірностей — 218.

Бойай, Янош (1802—1860) — видатний угорський математик. Незалежно від М. І. Лобачевського і дещо пізніше від нього прийшов до відкриття неевклідової геометрії — 98.

Бомбеллі, Рафаель — італійський математик та інженер другої половини XVI ст. Відомий дослідженнями рівнянь 3-го степеня — 123.

Бхаскара, або Бхаскара-акарія (тобто учений Бхаскара) (народ. 1114—рік смерті невідомий) — індійський математик та астроном. Основна праця «Вінець системи» (близько 1150 р.) містить виклад ряду питань, невідомих ще в той час в Європі — 122.

В

Варінг, Едуард (1736—1798) — англійський математик, професор Кембріджського університету. Відомий працями з алгебри, алгебраїчних кривих і теорії чисел —48.

Вектор — величина (сила, швидкість і т. д.), що характеризується не тільки числовим значенням, а й напрямом. Вектори зображуються напрямленими відрізками, тобто відрізками, в яких вказані початок і кінець — 173, 191.

Взаємно однозначна відповідність (або відображення)— таке відношення між двома множинами A і B, при якому кожному елементу множини A поставлений у відповідність один і тільки один елемент множини B, причому будь-який елемент множини B поставлений у відповідність деякому елементові множини A — 204.

Взаємно прості числа — цілі числа, що мають найбільший спільний дільник, який дорівнює 1 —48.

Виноградов, Іван Матвійович (народ. 1891) — видатний радянський математик, академік, відомий працями з теорії чисел. Виноградову належить розв'язання проблеми Гольдбаха та інші важливі результати — 48.

Висота додатного раціонального числа — сума $a + b$, якщо раціональне число записано у вигляді нескоротного дробу $\frac{a}{b}$ —206, 207.

Віднімання векторів — дія над векторами, обернена додаванню векторів — 179.

Відображення (в геометрії) — закон, за яким кожній точці деякої фігури ставиться у відповідність певна точка іншої або тієї ж фігури. Відображення подібності — відображення (або перетворення) фігури, що змінює тільки розміри фігури, але зберігає її форму — 100.

Вієт (або В'єт), Франсуа (1540—1603) — видатний французький математик. Відомий працями з алгебри і тригонометрії — 121.

Вісь — напрямлена пряма, тобто пряма з вказаним на ній напрямом — 105, 126.

Вісь абсцис — горизонтально напрямлена пряма з вказаним на ній додатним напрямом (зліва направо) і вибраною одиницею масштабу — 126.

Вісь ординат — вертикально напрямлена пряма з вказаним на ній додатним напрямом (знизу вгору) і вибраною одиницею масштабу — 126.

Г

Галуа, Еваріст (1811—1832) — французький математик, який заклав основи сучасної алгебри, зокрема теорії груп —123, 195.

Гамільтон, Уільям Роуан (1805—1865) — ірландський математик, професор Дублінського університету, президент Ірландської академії наук. Відомий працями в галузі алгебри та математичного аналізу — 124.

Гаусс, Карл Фрідріх (1777—1855) — видатний німецький математик, який вніс істотний вклад у розвиток ряду розділів теоретичної математики та її застосувань —123, 189, 190, 217.

Гельфонд, Олександр Йосипович (народ. 1906) — радянський математик, спеціаліст у галузі теорії чисел, професор Московського університету, член-кореспондент Академії наук СРСР —48, 189.

Геодезична лінія — лінія найкоротшої відстані на поверхні —115.

Геометрія Лобачевського — геометрична система, в якій приймається за вихідне положення аксіома Лобачевського про паралельні прямі, а решта аксіом однакова для геометрії Евкліда і геометрії Лобачевського — 93, 114.

Гервін — австрійський офіцер, який займався дослідженнями в галузі математики. Назалежно від Бойай довів теорему про рівноскладеність рівновеликих многокутників —98.

Герон (мабуть, I ст. до н. е.) — видатний грецький інженер і вчений. Відомий працями з механіки та прикладної математики — 124.

Гільберт, Давид (1862—1943) — німецький математик, творчість його мала значний вплив на розвиток математики в XX ст., професор університету в Геттінгені — 48, 109.

Гіпербола— геометричне місце точок на площині. Різниця відстаней від будь-якої з них до двох точок, які називаються фокусами, стала —87.

Гіперболоїд — одна з поверхонь другого порядку. Гіперболоїд обертання виникає від обертання гіперболи — 87, 125.

Гомотетія — таке відображення подібності, при якому залишається нерухомою одна точка — центр гомотетії O. Таким чином, якщо точка A переходить у A', то відношення $\frac{OA'}{OA} = k$, де k — стале для всіх точок A число, що називається коефіцієнтом гомотетії — 103.

Група —множина, для елементів якої визначена одна алгебраїчна операція, що підлягає певним законам —191.

Д

Д'Аламбер, Жан Лерон (1717—1783) — французький математик і філософ, член Паризької академії наук — 190.

Двійкова система числення — позиційна система числення з основою, що дорівнює 2. У двійковій системі числення всього дві цифри — 0 і 1 — 26, 71.

Декарт, Рене (1596—1650), латинізоване ім'я Картезій — видатний французький філософ, математик і фізик. Один з творців аналітичної геометрії — 121, 123, 124, 126.

Делоне, Борис Миколайович (народ. 1890) — радянський математик, спеціаліст у галузі теорії чисел, професор спочатку Ленінградського, а потім Московського університетів, член-кореспондент Академії наук СРСР — 47.

Дискримінант квадратного рівняння $ax^2+bx+c=0$ — це число $\Delta = b^2 - 4ac$. Залежно від знака дискримінанта рівняння має дійсні або комплексні корені — 124.
Дистрибутивність (розподільність) — властивість деяких операцій. Наприклад, множення чисел дистрибутивне відносно додавання. Закон дистрибутивності має вигляд $(a+b)c = ac + bc$—190.
Диференціальне рівняння — рівняння, в яке входять похідні функції від шуканої функції —170.
Диференціювання — знаходження похідних і диференціалів — 164.
Дійсне число — скінченний або нескінченний десятковий дріб —189.
Дільник (якого-небудь цілого числа) — ціле число, на яке дане число ділиться без остачі — 197.
Діофант (мабуть, III ст.) — старогрецький математик, який відкрив способи розв'язування деяких рівнянь, в основному неозначених. Основна його праця «Арифметика» була відправною точкою для розвитку теорії чисел Ферма, Ейлером і Гауссом—122, 124.
Додавання векторів — дія над векторами. Сума двох векторів, що не лежать на одній прямій, виходить як діагональ паралелограма, побудованого на цих двох векторах — 175.
Дотична до кривої в точці M — пряма, до якої наближається січна MN, коли точка N наближається (по розглядуваній кривій) до M —163.
Друга похідна — похідна від (першої) похідної — 170.

Є

Евклід (III ст. до н. е.) — найвидатніший старогрецький математик з Александрії. Основна праця — «Начала», яка відіграла колосальну роль у розвитку математики — 92, 109, 117.
Еволюта кривої лінії— геометричне місце центрів кривизни деякої кривої L. Сама крива L відносно своєї еволюти є евольвентою — 88.
Ейлер, Леонард (1707—1783) — великий математик, механік і фізик, член Петербурзької академії наук — 48, 123.
Еквівалентні множини — множини, між якими можна встановити взаємно однозначну відповідність —208.
Еліпс — геометричне місце точок на площині, в якому сума відстаней від будь-якої з них до двох точок, що називаються фокусами еліпса, стала — 84, 88, 105, 125.
Еліпсоїд — одна з поверхонь другого порядку. Еліпсоїд обертання виникає при обертанні еліпса навколо однієї з його осей — 89, 125.

Є

Єгипетський трикутник — прямокутний трикутник з сторонами, що дорівнюють 3, 4 і 5 — 40

Ж

Жірар, Альбер (1595—1632) — голландський математик. Відомий працями з алгебри і тригонометрії — 123.
Жордан, Марі Енмон Каміль (1838—1922) — французький математик, член Паризької академії наук і її президент, був членом-кореспондентом Академії наук у Росії. Широко відомі його праці в галузі алгебри, теорії функцій, топології і кристалографії —195.

З

Зворотне рівняння — рівняння виду $a_0x^n + a_1x^{n-1} + \ldots + a_{n-1}x + a_n = 0$, де $a_k = a_{n-k}$ при $k = 0, 1, 2, \ldots, n$—124.
Зчисленна множина — множина, яку можна поставити у взаємно однозначну відповідність з множиною всіх натуральних чисел — 206.

І

Імовірність події — стійка частота настання події при багаторазових повтореннях досліду — 214.
Інверсія (відносно кола S) — геометричне перетворення, при якому кожна точка A переходить у точку A' променя OA так, що $OA \cdot OA' = r^2$, де O — центр і r — радіус кола S. Інверсія є круговим перетворенням — 105.
Інтеграл (визначений) від функції на відрізку від a до b — границя інтегральних сум для функції при безмежному збільшенні числа розбивань відрізка $[a; b]$ і при прямуванні їх довжин до нуля —156.
Інтегральні суми для функції $f(x)$, означеної на відрізку від a до b — суми виду $f(x_1)(x_1-x_0) + f(x_2)(x_2-x_1)+\ldots+f(x_n)(x_n-x_{n-1})$, де $a=x_0<x_1<\ldots<x_{n-1}<x_n=b$, тобто x_0 і x_n — кінці розглядуваного відрізка, а $x_1, x_2, \ldots, x_{n-1}$—точки цього відрізка — 156.
Інтегрування — знаходження інтегралів — 158.
Інтервал (на числовій осі) — множина дійсних чисел x, більших від числа a і менших від числа b $(a < b)$; інтервал позначається символом (a, b) — 208.

К

Кантор, Георг (1845—1918) — німецький математик. Професор університету в Галлі. Творець теорії множин — 207.

Кардано, Джероламо (1501—1576) — італійський математик і механік. Відомий працями в галузі алгебри і теорії важелів (карданний вал) —123.

Квадратична ірраціональність — число виду $a+b\sqrt{c}$, де a, b і c — раціональні числа, але c не є квадратом раціонального числа —187.

Квадрування — один із способів вимірювання площ фігур, в основі якого лежить ідея заповнення фігури квадратиками —97.

Кеплер, Йоганн (1571—1630) —видатний німецький астроном (див. статтю «Йоганн Кеплер» в т. 2 ДЕ)—153.

Кільце — множина математичних об'єктів, для яких означені операції додавання і множення, підпорядковані певним законам — 190.

Клейн, Фелікс (1849—1925) — німецький математик. Основні праці присвячені неевклідовій геометрії, теорії неперервних груп, теорії алгебраїчних рівнянь та ін. — 106.

Колмогоров, Андрій Миколайович (народ. 1903) — радянський математик, академік. Відомий працями в різних галузях математики — 218.

Коло — геометричне місце точок на площині, однаково віддалених від певної точки, що називається центром кола —84, 103.

Комплексне число—число виду $a+bi$, де a і b дійсні числа, а $i=+\sqrt{-1}$ — 189, 190.

Комутативність (переставність) — властивість деяких операцій. Закон комутативності додавання, наприклад, має вигляд: $a+b=b+a$—190, 191.

Конгруентні числа — числа a і b називаються конгруентними або рівнолишковими за модулем m, якщо при діленні з остачею чисел a і b на m остачі рівні. Конгруентність чисел записують так: $a\equiv b \pmod m$ —197.

Колове перетворення — перетворення, що переводить усяке коло в коло (при цьому пряма вважається колом нескінченно великого радіуса) — 105.

Континуум-гіпотеза — гіпотеза, висловлена німецьким математиком Г. Кантором, про те, що будь-яка незчисленна множина дійсних чисел має ту саму потужність, що й множина всіх дійсних чисел. До цього часу це твердження не доведено і не відкинуто — 210.

Кубічна парабола — одна з кривих третього порядку. Її рівняння $y=x^3$— 88.

Кубування — один із способів вимірювання об'ємів тіл, ідея якого полягає в заповненні тіла кубами — 100.

Лагранж, Жозеф Луї (1736—1813) — видатний французький математик і механік, член Паризької академії наук, був членом і президентом Берлінської академії наук. Найважливіші праці Лагранжа стосуються математичного аналізу і теоретичної механіки —47, 48, 194.

Ланцюгова лінія — лінія, по якій провисає важка нерозтяжна нитка — 87.

Лаплас, П'єр Сімон (1749—1827) — видатний французький астроном, математик і фізик, член Паризької академії наук —40, 213, 217.

Лейбніц, Готфрід Вільгельм (1646—1716) — знаменитий німецький математик і філософ—49, 62, 123, 167.

Лемніската — одна з кривих четвертого порядку — 88.

Леонардо Пізанський (Фібоначчі) (народ. близько 1170, помер після 1228) — італійський математик. Одним з перших у Європі запровадив у вжиток індійські цифри —27, 122, 124.

Лишок за модулем m — остача r від ділення деякого числа a на модуль m, або на число, що відрізняється від r доданком, кратним m, тобто на $r+q\cdot m$ — 197.

Ліндеман, Фердінанд (1852—1939) — німецький математик, професор у Кенігсберзі та Мюнхені — 189.

Лінійне перетворення — таке відображення, при якому всяка пряма перетворюється в пряму —103, 104.

Лінія — абстрактне поняття, що є абстракцією від реальних фізичних образів, таких, як траєкторія рухомого тіла і т. д. — 130.

Лобачевський, Микола Іванович (1792—1856) — великий російський математик, творець неевклідової геометрії, що носить зараз його ім'я. Ректор Казанського університету — 93, 117, 124.

Логарифмічна лінійка — лічильний прилад для наближених обчислень — 59.

Логарифмічна шкала — один з видів шкал. Будують логарифмічну шкалу так. Вибравши деяку одиницю масштабу E (модуль шкали), відкладають відрізки, що дорівнюють $E\ln x$, для різних значень $x=x_1,\ x_2,\ \ldots$ і над кінцями відповідних відрізків ставлять позначки, що дорівнюють аргументу $x_1,\ x_2,\ \ldots$. Логарифмічна шкала використовується на лічильній логарифмічній лінійці, в номографії тощо —60.

Ляпунов, Олександр Михайлович (1857—1918) — видатний російський математик і механік, академік. Відомий працями в галузі математичного аналізу і теорії імовірностей — 218.

Магніцький, Леонтій Пилипович (1669—1739) — автор першого систематичного підручника з математики російською мовою (виданий у 1703 р. в Москві), що відіграв дуже велику роль в справі розвитку культури нашої Батьківщини — 120.

Марков, Андрій Андрійович (1856—1922) — видатний російський математик, академік. Відомий працями з теорії чисел, теорії імовірностей і математичного аналізу — 217.

Метод розсіювання — один із способів розв'язування неозначених рівнянь у цілих числах. Був запропонований індійськими математиками раннього середньовіччя — 43.

Метод хибного положення — один з найстародавніших методів розв'язування арифметичних задач — 119.

Многогранник — геометричне тіло, обмежене плоскими поверхнями —гранями многогранника — 85.

Многокутник — плоска геометрична фігура, обмежена відрізками — сторонами многокутника — 97.

Множення вектора на число k — операція над вектором, в результаті якої утворюється вектор того ж напряму, але з довжиною, зміненою в k раз (у випадку $k>0$), або ж утворюється вектор протилежного напряму з довжиною, зміненою в $-k$ раз (у випадку $k<0$) — 178.

Множина — сукупність деяких предметів, які називаються елементами цієї множини — 192.
Модуль шкали — одиниця масштабу на функціональній шкалі— 60.
Мультиплікативний принцип — основа одного з можливих способів запису чисел в непозиційній системі числення —38.

Н

Напрямлений відрізок — відрізок прямої, на якій вибрано напрям, додатний в одну сторону і від'ємний в іншу. Напрямлені відрізки тому теж можуть бути додатними і від'ємними — 173.
Натуральний логарифм — логарифм, основою якого є число Непера $e \approx 2{,}71828\ldots$ Натуральний логарифм числа a позначається так: $\ln a$ — 141.
Натуральні числа — цілі додатні числа 1, 2, 3, 4,... Сукупність усіх натуральних чисел називають натуральним рядом чисел — 202.
Неевклідові геометрії — геометричні системи, в яких одна або кілька аксіом звичайної геометрії Евкліда замінені іншими аксіомами, що не справджуються в евклідовій геометрії —114.
Незвідний многочлен — многочлен, який не можна подати у вигляді добутку двох многочленів з коефіцієнтами з того ж поля і степенів не нижче першого — 187.
Незчисленна множина — нескінченна множина, що не є зчисленною. Множина всіх дійсних чисел є незчисленною множиною — 207.
Некомутативна група—група, в якій операція не підлягає закону комутативності (переставності)—193.
Неозначене рівняння — рівняння, що має нескінченну множину розв'язків, наприклад рівняння $x + y = 3$. Неозначеним рівнянням називають також рівняння, в якому більше від одного невідомого — 42.
Непер, Джон (1550—1617) — шотландський математик, винахідник логарифмів — 57.
Нескінченна множина — множина, яка не є скінченною множиною. Нескінченна множина завжди містить частину, що є зчисленною множиною —202.
Несумірні відрізки — відрізки, що не мають спільної міри. Найпростіші несумірні відрізки — діагональ і сторона квадрата —91.
Нуль-вектор—спеціальний вектор, у якого збігаються кінець і початок, через що він не має певного напряму — 176.

О

Обвідний многокутник — многокутник, всередині якого міститься заданий многокутник—98.
Обертання в площині — такий рух, при якому одна точка O залишається нерухомою, а всяка інша точка A переходить у точку A', таку, що $\angle A'OA$ сталий для всіх точок A — 103.
Об'єм тіл — додатні числа, які поставлені у відповідність тілам за певними правилами вимірювання об'ємів —99.
Однер В. Т. — петербурзький інженер. У 1874 р. винайшов арифмометр — 62.
Ознаки подільності — правила, за якими можна, не виконуючи ділення, встановити, чи ділиться дане число на друге чи ні— 199.
Основна теорема алгебри говорить, що будь-яке алгебраїчне рівняння має в полі комплексних чисел хоч би один корінь —190.
Остача — таке число r, що при діленні цілого числа a на ціле число b справджуються дві умови:

$$1)\ a = bq + r \text{ і } 2)\ 0 \leqslant r < |b|.$$

Тут q—неповна частка від ділення з остачею—196.

П

Парабола — геометричне місце точок на площині, однаково віддалених від певної точки, що називається фокусом параболи, і певної прямої, яка називається директрисою — 86, 160.
Парабола 4-го степеня — крива лінія, що має рівняння $y = ax^4$ — 89.
Параболоїд — одна з поверхонь другого порядку — 86.
Паралелепіпед — тіло, утворене перетином трьох пар відповідно паралельних площин —83.
Паралельне перенесення — такий рух, при якому всі відрізки, що сполучають всякі дві відповідні точки, мають один і той же напрям і одну й ту ж довжину — 101.
Паралельне проектування — таке перетворення (або відображення) деякої площини, при якому кожна її точка A переходить у точку A' іншої площини A' так, що прямі AA' для всіх точок A паралельні — 104.
Паралельні прямі — в геометрії Евкліда паралельними прямими називаються всякі дві прямі, що лежать в одній площині і не мають спільних точок — 110.
Паскаль, Блез (1623—1662) — видатний французький математик, фізик і філософ — 62, 215, 217.
Переставний закон додавання — властивість додавання, яка полягає в тому, що $a + b = b + a$. Переставний закон називають також комутативним законом. Переставний закон вірний не тільки для додавання чисел, а й для додавання векторів, функцій і т. д. —190, 191, 192.
Перехідна крива — крива лінія, за формою якої згинають рейку на поворотах —87.
Перфокарта — картонна картка стандартної форми, за допомогою якої кодують інформацію в лічильно-аналітичних машинах —76.
Підмножина — множина, складена з частини предметів (елементів) даної множини — 204.
Підстановка — заміна елементів A_1, A_2, ..., An цими ж елементами, але в іншому порядку. Множина всіх підстановок утворює групу — 194.
Піфагор (народ. близько 580 р. — помер у 500 р. до н. е.) — старогрецький математик і філософ. Заснував у м. Кротоні філософську школу — 41, 90, 107.
Піфагорів трикутник — прямокутний трикутник, сторони якого виражені цілими числами —41.

Площина — одне з основних математичних понять. Означення для площини не дається. Властивості площин розкриваються аксіомами —83, 85, 108.

Площі фігур — додатні числа, поставлені у відповідність фігурам при виконанні певних правил — 95.

Позиційні, або помісні, системи числення—системи запису чисел, в яких строго враховується місце (позиція), яке займає цифровий знак — 25, 36.

Показникова функція — функція виду $y = a^x$, де a — деяке додатне число —141.

Постулат — те саме, що й аксіома — 92.

Потужність — характеристика кількісно еквівалентних множин, тобто множин, між якими можна встановити взаємно однозначну відповідність — 208.

Похідна від функції — границя відношення приросту функції до приросту аргумента, коли приріст аргумента прямує до нуля — 164

Початок координат — точка перетину осей координат, тобто осі абсцис і осі ординат — 126.

Правило середини — один із способів додавання векторів — 175.

Правильний многокутник — многокутник, у якого всі сторони рівні і всі внутрішні кути при вершинах рівні. Правильних многокутників нескінченно багато —83.

Примітивна (первісна) функція — функція, похідна від якої дорівнює заданій функції —167.

Простаферетичний спосіб множення — полягає в тому, що множення замінюється додаванням, спираючись на тотожність $\frac{(a+b)^2}{4} - \frac{(a-b)^2}{4} = ab$ і на аналогічні тотожності—55.

Просте число — натуральне число, більше 1 і таке, що ділиться тільки на 1 і на самого себе. Прості числа іноді називають первісними числами — 48.

Пряма (лінія) — одне з основних понять геометрії. Означення для прямої лінії не дається. Властивості прямих ліній розкриваються аксіомами — 107.

Псевдосфера — поверхня, утворювана обертанням кривої лінії, що називається трактрисою — 115.

Пуассон, Сімеон Дені (1781—1840) — видатний французький механік, фізик і математик, член Паризької академії наук, почесний член Петербурзької академії наук —217.

Р

Раціональне число — відношення двох цілих чисел a до b, де $b \neq 0$ — 46, 186.

Рівнопротилежні вектори — два вектори, що зображуються рівними за довжиною паралельними відрізками з протилежними напрямами. Сума рівнопротилежних векторів є нуль-вектор — 176.

Ріман, Георг Фрідріх Бернхард (1826—1866) — видатний німецький математик. Професор математики в Геттінгенському університеті. Праці Рімана мали великий вплив на розвиток математики другої половини XIX ст., особливо в галузі неевклідової геометрії — 93, 115.

Розширення поля — поле, утворене з іншого поля приєднанням нових елементів — 187.

Рух — відображення, що змінює положення фігури, але зберігає її форму і розміри — 101.

С

Середня лінія трапеції — відрізок, що сполучає середини двох бічних сторін трапеції — 183.

Симетричні точки — точки, що відповідають одна одній при симетрії. Симетричні точки при осьовій симетрії лежать на перпендикулярі до осі симетрії по різні сторони від неї і на рівній відстані від неї. При центральній симетрії симетричні точки лежать на прямій, що проходить через центр симетрії і на рівній відстані від нього —101.

Синусоїда — графік тригонометричної функції $y = \sin x$ — 145.

Січна лінія кривої — пряма, що має з даною кривою не менше двох спільних точок — 163.

Скінченна множина — множина, яка складається лише з скінченного числа предметів (елементів). Скінченна множина, на відміну від нескінченної, характеризується тим, що будь-яка її підмножина (яка не збігається з усією множиною) не може бути приведена у взаємно однозначну відповідність з самою множиною — 202.

Слимак Паскаля—крива лінія четвертого порядку—140.

Соруban — стародавній японський лічильний прилад, подібний до російської рахівниці —57.

Спектральний аналіз (у математиці) — розкладання графіка періодичного коливального процесу на синусоїдальні складові. Спектральний аналіз називають також спектральним розкладанням — 151.

Сполучний закон додавання — властивість додавання, яка полягає в тому, що $(a+b)+c = a+(b+c)$. Сполучний закон називають також асоціативним законом. Сполучний закон вірний не тільки для додавання чисел, а й для додавання векторів, функцій тощо —177.

Стискання прямої l — відображення (або перетворення), при якому кожна точка A переходить у точку A' перпендикуляра, опущеного на l з A, так що відношення відстані від A' до l до відстані від A до l змінюється в k раз, де k — стале число. Якщо $k>1$, то дістаємо, строго кажучи, «розтягнення від прямої l», а не стискання, але для зручності формулювань цей випадок теж прийнято вважати «стисканням»—104.

Суан-пан — стародавній китайський лічильний прилад, що нагадує російську рахівницю —56.

Сферичний трикутник — трикутник на сфері, утворений дугами трьох великих кіл, тобто кіл, які мають радіуси, що збігаються з радіусом сфери. Сума внутрішніх кутів сферичного трикутника більша від 180° —23, 115.

Т

Тарталья, Нікколо (близько 1499—1557) — італійський математик. Відомий працями в різних галузях математики та її застосувань. Відкрив спосіб розв'язування рівнянь 3-го степеня — 123.

Теорема — математичне твердження, яке доводять на основі аксіом — 109.
Теорія імовірностей — галузь математики, що вивчає закономірності випадкових явищ —214.
Топологічні властивості фігури — властивості фігури, які не змінюються ні при яких неперервних деформаціях — 106.
Топологія — галузь математики, що вивчає топологічні властивості фігур — 106.
Тор — поверхня, утворювана обертанням кола навколо прямої, що лежить у площині кола і не перетинає його —86.
Точка — одне з основних понять у геометрії. Означення для точки не дається. Властивості точок розкриваються аксіомами — 107.
Трансцендентне число — неалгебраїчне число, тобто число, яке не є коренем ні для якого многочлена з цілочисловими коефіцієнтами — 189.
Трисекція кута — задача про поділ кута на три рівні частини. З допомогою тільки циркуля і лінійки трисекція неможлива — 139.
Тріангуляція— один із способів вимірювання площ многокутників, який зводиться до розбивання многокутника на трикутники і вимірювання їх площ—97.

Ферма, Пьєр (1601—1665) — відомий французький математик, який вніс значний вклад у розвиток ряду її галузей — 48, 201, 217.
Феррарі, Лодовіко (1522—1565) — італійський алгебраїст. Винайшов спосіб розв'язування в радикалах рівняння 4-го степеня — 123.
Ферро, Даль Ферро, Сципіон (1465—1526) — італійський математик, професор математики в Болонському університеті. З ім'ям Ферро зв'язано розв'язування рівнянь 3-го степеня в радикалах — 123.
Формула Герона — формула для обчислення площі трикутника $S_\Delta = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$. Тут a, b і c — сторони трикутника, а p — половина периметра — 51.
Формула Ньютона — Лейбніца — формула, що вказує на зв'язок визначеного інтеграла з невизначеним — 167.
Функція — залежність деякої величини від інших величин. Поняття функції є одним з найважливіших у математиці —141.

Хайям, Смар (близько 1040—1123) — видатний таджицький математик, філософ і поет —123.
Хорда — відрізок, що сполучає дві довільні точки кривої або поверхні —105.

Центр кола — точка, однаково віддалена від усіх точок кола — 105.
Циклоїда — крива лінія, яка є слідом точки кола, що котиться без ковзання по прямій. Розрізняють також вкорочені і здовжені циклоїди — 88.
Цілочисловий трикутник — трикутник, довжини сторін якого виражаються цілими числами — 41.

Частота події — відношення числа сприятливого результату дослідів (числа настання події) до загального числа проведених випробувань — 213.
Чебишев, Пафнутій Львович (1821—1894) — великий російський математик і механік, академік Петербурзької і багатьох іноземних академій наук. Чебишеву належать дуже глибокі результати в теорії чисел, теорії імовірностей, теорії механізмів та інших галузях математики — 217.
Число Непера — число e, що дорівнює $\lim\limits_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^n$. Число e — ірраціональне і наближено дорівнює 2,718281828459... Число Непера відіграє в математиці велику роль і, зокрема, є основою натуральних логарифмів — 141.
Числове поле — множина чисел, яка складається більш як з одного числа, в якому здійсненні чотири дії: додавання, віднімання, множення і ділення (крім ділення на нуль) — 186.

Умовні позначення і скорочення

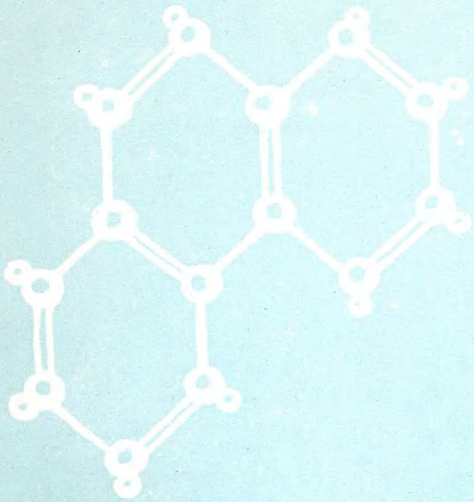
МАТЕМАТИЧНІ ПОЗНАЧЕННЯ

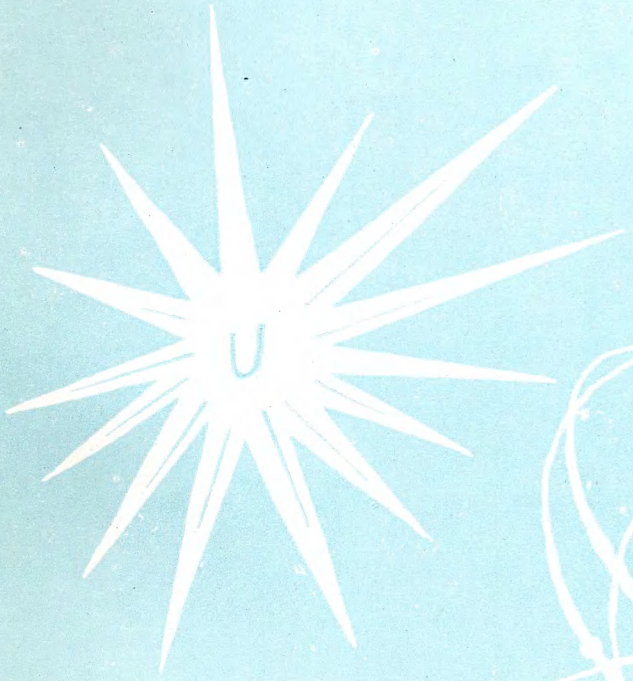
$>$ — більше
$\geqslant$ — більше або дорівнює (не менше)
$\lim$ — границя
$\int$ — інтеграл (невизначений)
$\int_a^b$ — інтеграл визначений, з нижньою межею a і верхньою межею b
$\angle$ — кут
$\lg$ — логарифм десятковий
$\ln$ — логарифм натуральний
$\log_a b$ — логарифм при основі a числа b
$<$ — менше
$\leqslant$ — менше або дорівнює (не більше)
mod — модуль
$\approx$ — наближено дорівнює
∞ — нескінченність
$\parallel$ — паралельно
$\perp$ — перпендикулярно
Δ — приріст
$\%$ — процент
$\rightarrow$ — прямує до
const — стала
Σ — сума
$\equiv$ — тотожно або тотожно дорівнює
$\triangle$ — трикутник
$f(), F()$ — функція одного або кількох змінних

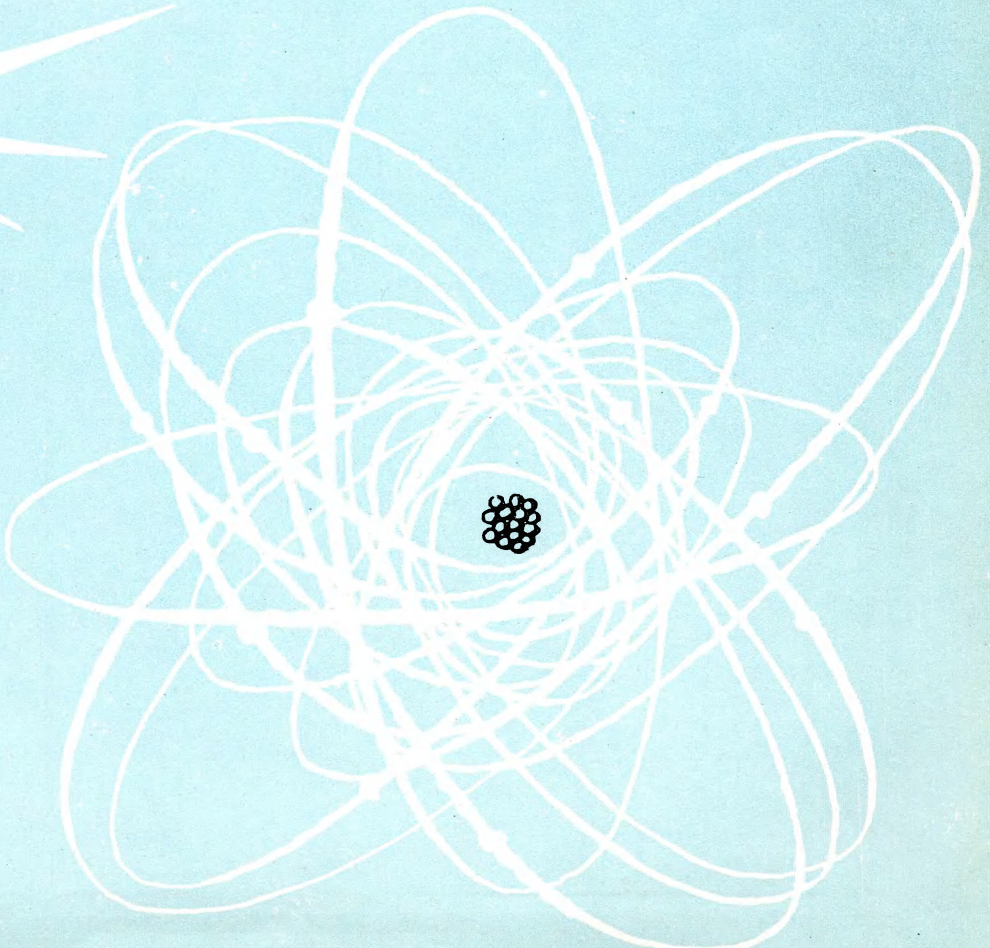
ГРЕЦЬКИЙ АЛФАВІТ

Αα альфа
Ββ бета
Γγ гама
Δδ дельта
Εε епсилон
Ζζ дзета
Ηη ета
Θϑ тета
Ιι йота
Κκ капа
Λλ ламбда
Μμ мі
Νν ні
Ξξ ксі
Οο омікрон
Ππ пі
Ρρ ро
Σσς сигма
Ττ тау
Υυ іпсилон
Φφ фі
Χχ хі
Ψψ псі
Ωω омега

Речовина і Енергія







Фізика!.. Це слово добре відоме кожному школяреві — адже ж це один з основних навчальних предметів. Багато хто любить фізику і не тільки з цікавістю слухає пояснення вчителя на уроках, але й із захопленням займається в шкільних фізичних гуртках. Щоправда, є учні, яким шкільний курс фізики здається сухим і нецікавим. Не будемо сперечатися з ними: адже для того щоб судити про будь-який предмет, треба насамперед його добре знати. А не кожний учень знає, наскільки різноманітна фізика, яку величезну кількість явищ природи вивчає ця наука.

Спробуйте кількома словами визначити, що вивчає фізика. Навряд чи вам це вдасться.

МІСЦЕ ФІЗИКИ СЕРЕД ІНШИХ НАУК ПРО ПРИРОДУ

В інших випадках це нібито простіше. Ось, наприклад, астрономія вивчає різні небесні тіла — планети, зірки, туманності. Біологія — це наука про живий світ: рослини і тварин. Географія вивчає поверхню Землі, геологія — її надра і т. д. А фізика?

Спробуємо розібратися в цьому питанні, яке виявляється зовсім не таким простим, як можна було спочатку гадати.

Візьмемо такий приклад.

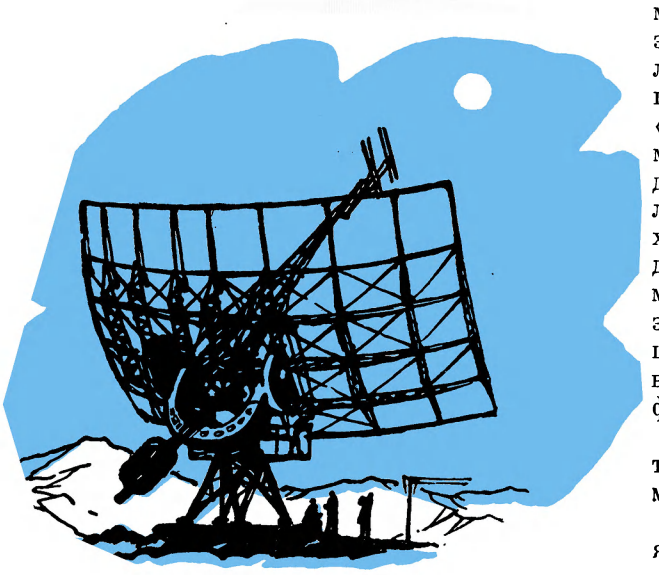
Нас цікавить ріст рослин. На перший погляд це не має ні найменшого відношення до фізики. Трохи терпіння! Вивчення росту і розвитку рослин може обмежитися докладним описом зовнішніх подій: як швидко збільшується розмір листя, яким темпом зростає товщина стовбура, як утворюється квітка і т. д.

Це не фізика. Можна, як це роблять агрономи, зацікавитися впливом сонячного проміння і добрив або густої поливки на швидкість росту й розвитку рослини. В розв'язанні цих важливих питань також немає фізики. Але при вивченні росту рослин перед вдумливим дослідником виникає багато різних «чому» зовсім іншого роду. Чому вода підіймається вгору по стеблині рослини і може добратися до верхівки найвищої сосни? Чому листя зелене весною й літом, а восени жовтіє? Яку роль відіграють в житті рослини сонячне проміння й волога і яким способом рослина виділяє кисень?

Так само стоїть справа і з багатьма іншими науками. Як ще один приклад можна взяти астрономію.

Астрономи вивчають зірки. Вони складають карти зірок, поділяють зірки на групи за їх яскравістю, розмірами або відстанню від Сонця. У всьому цьому фізики немає. Проте, вивчаючи зірки, астроном, як і ботанік, неминуче повинен буде поставити перед природою ряд питань: чому світяться зірки? Чим пояснюється, що більшість зірок складається з легких елементів — водню й гелію? Як зв'язане з життям зірок космічне випромінювання, що доходить до нас із Всесвіту?

Знайти відповіді на ці й багато інших питань, що виникають у ботаніків, астрономів, геологів і вчених багатьох інших спеціальностей,— значить показати, яким загальним законам природи підлягає виучуване нами явище.



Завдання фізики й полягає в тому, щоб знайти ці загальні закони, з'ясувати за їх допомогою все, що відбувається навколо нас в природі, і поставити їх на службу науковому передбаченню. Без знання загальних законів природи, без уміння їх застосовувати для передбачення ще не відкритих явищ людина не могла б стати господарем природи.

Застосування методів дослідження, розроблених фізиками, виявляється надзвичайно плодотворним і в інших, суміжних з фізикою науках: у біології, геології, хімії та ін. Так, застосовуючи для розв'язання завдань біології фізичні й математичні методи дослідження, вчені закладають основи нової захоплюючої й багатообіцяючої науки — біофізики. А відповіді на багато питань, що виникають при вивченні надр Землі, океанів, морів, оточуючої її атмосфери, дає геофізика.

Вивченням можливості й швидкості проходження різних хімічних реакцій (з погляду загальних законів природи) займається хімічна фізика. Основи найважливіших технічних дисциплін — металургії, енергетики, технології — є галуззю технічної фізики.

Основи фізики як науки були вперше закладені в працях італійського вченого XVII ст. Галілео Галілея. Цю чудову людину і вченого можна назвати основоположником фізики.

Звичайно, ще стародавні китайці, вавілоняни, єгиптяни й греки нагромадили цінні відомості з окремих питань фізики. Проте це були лише випадкові й несистематизовані дані. Ми знаходимо у стародавніх людей ряд правильних описів фактів, але їх наукове тлумачення викликає у сучасної людини глибоке здивування. Справа в тому, що для науки людей того часу було характерним намагання пояснити весь світ, виходячи з небагатьох «чистих ідей». Там, де в основу міркування можна було покласти ясні й виразні вихідні дані — аксіоми (наприклад, в геометрії), мислителям стародавнього світу удавалось приходити до правильних результатів і навіть дати світу блискучі докази сили логічного мислення. Але в тих випадках, коли основні закони не були самоочевидними, спроби залишатися в рамках «чистих ідей» не могли привести, звичайно, до правильного розуміння фізичного світу.

Характерною щодо цього є «Фізика» Арістотеля, заповнена міркуваннями, з якими не можна погодитися з позицій сучасної науки.

Ось одне з таких міркувань про фізичні явища, яке ми знаходимо в Арістотеля. Старо-

грецькі мислителі багато сперечалися про те, як будуть падати тіла в просторі, з якого видалено повітря. Одні говорили, що важкі тіла повинні падати швидше, ніж легкі, і наводили «переконливі» доводи на користь такої думки; інші твердили протилежне. Арістотель погоджується з тим, що в вакуумі (пустоті) всі тіла, як важкі, так і легкі, повинні падати однаково швидко. Із цього, проте, він робить несподіваний висновок: «...падіння різних тіл з однаковою швидкістю настільки абсурдне, що очевидна неможливість існування вакууму».

Галілей був першим мислителем, який ясно зрозумів, що закономірності поведінки фізичних тіл не можна вивести за допомогою «чистих ідей», що їх слід встановлювати дослідним вивченням природи. Фізичний дослід (експеримент) — це питання, поставлене природі. Якщо питання поставлено правильно, то природа на нього відповість.

Скидаючи тіла різної ваги з великої висоти, Галілей дійшов висновку, що час їх падіння не залежить від ваги. Так він на досліді встановив важливий закон природи. Знайти його можна було тільки шляхом експерименту. Жодними логічними міркуваннями не можна довести ту обставину, що тіла падають з однаковою швидкістю незалежно від їх ваги.

Дослід лежить в основі фізики, але це не значить, що він — єдиний спосіб пізнання фізичної істини. В міру нагромадження дослідних фактів виникає потреба розглянути їх з єдиної, загальної точки зору. Це завдання розв'язується за допомогою математичних методів і логічних суджень.

Приклад допоможе нам зрозуміти їх роль у фізиці. Всі тіла незалежно від своєї ваги однаково падають на Землю; всі маятники однакової довжини коливаються однаково незалежно від їх маси; Місяць обертається навколо Землі, а Земля — навколо Сонця по незмінних орбітах. На перший погляд, що спільного між цими окремими закономірностями? Проте Ньютон показав, що всі згадані явища є наслідки того самого закону — закону всесвітнього тяжіння. Для того щоб це довести, треба вдатися до логічних міркувань і до математичних обчислень. Це і є прикладом застосування теоретичних методів у фізиці.

Розвиток фізики пов'язаний з одночасним використанням обох її методів — експеримен-

тального й теоретичного. Дослідна фізика розробляє й здійснює фізичні досліди та систематизує здобуті наслідки. Теорія узагальнює окремі закономірності і зводить їх до невеликого числа загальних законів природи. Після того, як такий закон виявлено, фізика перевіряє його застосовність до нових, ще не досліджених явищ. Якщо знайдено суперечність — дослід і теорія не збігаються, — теоретична фізика мусить знову взятися за роботу і внести потрібні поправки в формулювання відомих до того часу законів.

Для величезного класу фізичних явищ такі загальні закони природи твердо встановлені.

Це стосується, наприклад, науки про рух тіл і крупних частинок — м е х а н і к и, яка грунтується на законах, відкритих Ньютоном. Це стосується електромагнітних явищ — законів одержання й поширення електромагнітних хвиль, правил дії електротехнічних і радіотехнічних схем. Ця величезна галузь знання спирається на загальні закони природи, встановлені Фарадеєм і Максвеллом (до них належить, наприклад, закон електромагнітної індукції). До певної міри закінченим є також вчення про теплові явища, які підлягають закону збереження й перетворення енергії та закону неможливості побудови вічних двигунів.

Зрозуміло, це не означає, що в галузях знань, про які ми тільки що говорили, не можуть бути зроблені важливі відкриття або знайдені нові закони природи. Проте можна впевнено сказати, що такі нові закони, якщо вони будуть знайдені, не порушать стрункості й ясності перелічених нами розділів фізики.

Поряд з більш або менш закінченими галузями існують розділи фізики, в яких кипить дослідна робота, де ще неясні загальні закони природи. Це стосується насамперед молекулярної, атомної, ядерної фізики.

Те, що відкриття нових фізичних явищ і законів завжди мало вплив на життя людини, можна проілюструвати незчисленною кількістю прикладів. Фарадей у 1832 р. ще не знав, чи можна знайти практичне застосування відкритому ним закону електромагнітної індукції. Минуло всього тридцять років від моменту цього відкриття, і промисловість дістала електричні динамомашини. В основу їх конструкції покладено закон індукції. Електромагнітні хвилі були відкриті Генріхом Герцом у 1888 р., а вже в 1895 р. наш видатний співвітчизник О. С. Попов демонстрував перший у світі радіоприймач.

Щоб наблизитися до сьогоднішнього дня, скажемо про вплив атомної фізики на сучасну техніку. Дослідження законів руху електронів у вакуумі привело до створення електронної лампи й телевізійної трубки. Вивчення законів електропровідності привело до відкриття чудових властивостей напівпровідників. Техніка використала ці досягнення й розробила способи виготовлення кристалічних діодів і тріодів, які відкрили величезні перспективи перед багатьма галузями радіоелектроніки.

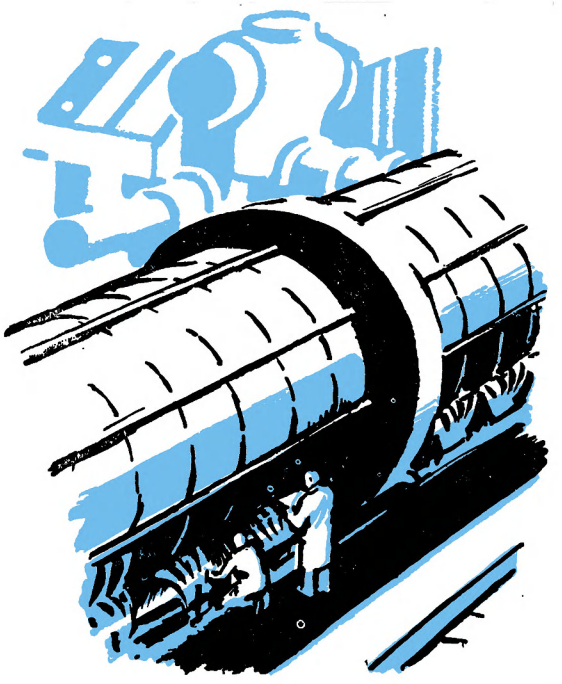
Протягом двадцяти років фізики працювали над вивченням будови атомного ядра, однодушно вважаючи, що ці дослідження мають тільки теоретичний інтерес і не можуть спричинитися до практично важливих результатів. Проте перед другою світовою війною було відкрито поділ уранового ядра і почалась ера оволодіння внутрішньоядерною енергією.

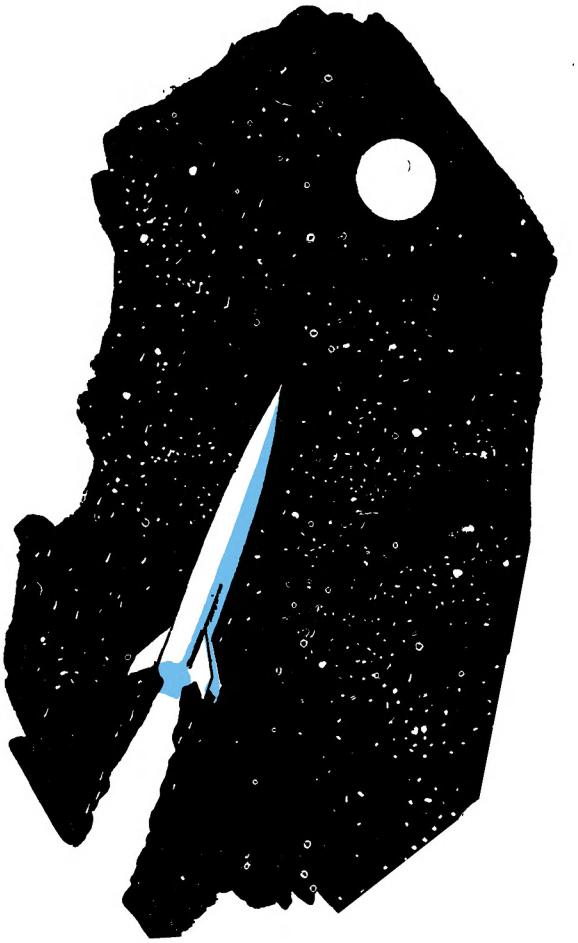
Із цих небагатьох прикладів ясно, що всі події, які мають революційне значення для техніки, а отже, і для всього майбутнього людства, були природним наслідком відкриттів, зроблених фізиками.

Але завдання фізичної науки цим не вичерпані цілком. Тепер з найбільшим захопленням фізики працюють над двома проблемами: дослідженням елементарних частинок і застосуванням фізики до питань біології.

Перше завдання пов'язане з відповіддю на основне питання науки: «З чого побудовано світ?» Успіхи технічних засобів атомної фізики (таких, наприклад, як величезні прискорювачі частинок, подібні до радянського синхрофазотрона на 10 млрд. електрон-вольтів) дали змогу добитися великих успіхів у цій галузі. Можна передбачати, що найближчими роками ми дістанемо виразне уявлення про властивості й особливості всіх елементарних частинок. Однак до цього часу не створено теорії, яка могла б пояснити, як виникають і «живуть» спостережувані частинки.

Застосування фізики в біології по суті справи тільки-но починається. Перед дослідниками стоять найскладніші завдання експериментального дослідження фізичних і хімічних процесів, що відбуваються в живому організмі. Глибоке пізнання цих процесів дасть можливість ученим ще рішучіше втручатися в життя рослин, тварин і людини. Це не тільки принесе величезну господарську користь, але також дасть змогу впевнено боротися з усіма захворюваннями й забезпечить людині довге життя.





Величезною лишається роль фізики в швидкому розвитку техніки. Одним з найцікавіших фізико-технічних завдань є створення матеріалів з наперед заданими властивостями. Особливо велику вагу мають праці по створенню матеріалів, що залишаються міцними при високих температурах або поєднують еластичність і міцність, а також матеріалів, які поєднують в собі властивості електричного ізолятора й магніту. Щоб розв'язати ці завдання, потрібні глибокі фізичні дослідження, які виясняють зв'язки структури матеріалу з його властивостями.

Не менш цікаві питання, які стоять перед дослідниками, що вивчають фізичні явища, які відбуваються при горінні; знання законів горіння необхідне для створення ракет далекої дії. Величезне поле діяльності розкривається перед фізиками, що вивчають будову атомного ядра,— адже епоха ядерної енергії тільки-но почалась.

Оволодіння термоядерною енергією є завданням, важливість якого не можна переоцінити. Бажання поставити таке необмежене джерело енергії на службу людству привернуло до цієї проблеми величезну армію дослідників. Вони розв'язують суто фізичні завдання, без розуміння яких ця мета не може бути досягнута.

Обізнаність з найважливішими фізичними законами, що лежать в основі всіх явищ природи, в основі дії всіх сучасних машин, з законами, без яких не можна зрозуміти життя рослин і тварин, обов'язкова тепер для кожної людини, яка хоче назвати себе освіченою й культурною. Давно минув той час, коли мірилом освіченості служила одна лише обізнаність з літературою, живописом і музикою. Людина, обізнана з живописом Рембрандта, п'єсами Шекспіра та музикою Чайковського, але яка не розуміє, чому Земля не падає на Сонце, чому з атомних ядер можна черпати енергію і «хто» накреслює зображення на екрані телевізора, не може назвати себе освіченою людиною.

Статті, вміщені в розділі «Фізика», звичайно, далеко не вичерпують всього змісту цієї чудової науки. Але читач знайде тут багато нових для себе й цікавих відомостей з усіх основних галузей фізики. Ось чому прочитати вміщені тут статті буде дуже корисно не лише тим, хто вже тепер любить фізику й техніку, але й майбутнім історикам, літераторам і географам, всім майбутнім славним трудівникам, новаторам і раціоналізаторам виробництва. В наш час знання основ фізики необхідне для всіх!

Механічні явища

ОСНОВИ МЕХАНІКИ

Вийдемо осіннім ясним вечором, глянемо на темне, вкрите зірками небо. Безліч зірок важко запам'ятати, і здається, що їх неможливо перелічити. Але раптом серед зірок з'явилася вогняна точка, що стрімко несеться по темному небу. Це метеор. Він мимоволі привертає до себе увагу людей. Метеор неможливо не помітити, якщо дивитись на небо в момент його польоту. Не будемо говорити зараз про те, що таке метеор. Про це докладно сказано в т. 2 ДЕ. Для нас важливе зовсім інше: серед тисяч зірок цей метеор був нами миттю помічений. Чому це сталося? Відповідь знайти неважко. Метеор виділяється завдяки своєму стрімкому рухові.

Якщо вдуматися глибше, то можна кінець кінцем переконатися в тому, що ми пізнаємо навколишній світ і самих себе тільки завдяки тому, що є рух. Ми розглядаємо предмети, слідкуючи за ними поглядом, повертаючи голову, переходячи з місця на місце. Ми діємо на навколишні речі, пересуваючи чи переносячи їх, змінюючи їх, переміщаючи їх окремі частини.

Але й незалежно від нашого впливу все в навколишньому світі і всередині нас так чи інакше рухається. Увесь матеріальний, тобто реально існуючий, світ перебуває в стані руху, що вічно змінюється, але ніколи не згасає. Можна сказати: рух — це спосіб існування матерії.

МЕХАНІЧНИЙ РУХ, АБО ПЕРЕМІЩЕННЯ

Рух може бути різний. Ось, наприклад, якщо лити воду на землю, то утворюється калюжа, поверхня якої в міру виливання води збільшується. Якщо надувати повітрям футбольний м'яч, зростає його об'єм. Але це порівняно складні види руху.

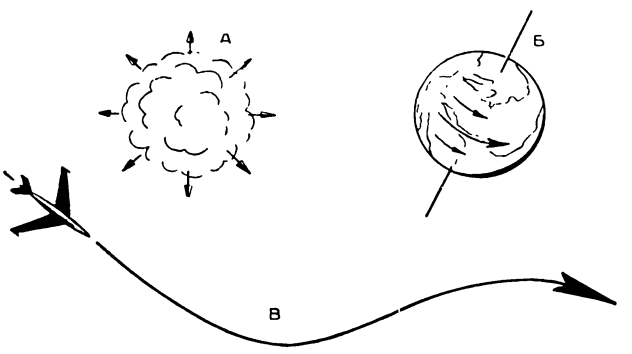
Найпростішою формою руху є переміщення якого-небудь предмета вздовж певного шляху. Особливо просто розглядати таке переміщення, коли розміри тіла малі порівняно з тим шляхом, який воно проходить під час свого руху.

Наприклад, уявіть собі, що ми їдемо автомашиною і, зупинившись, питаємо в перехожого: «Скільки кілометрів лишилося до Москви?» Було б дуже смішно, якби він відповів: «Шоферові до Москви лишилося десять кілометрів, а пасажирам, які сидять на задньому сидінні,— десять кілометрів і один метр...» Один метр порівняно з десятьма кілометрами—дуже мала величина, і в багатьох випадках такою малою величиною можна знехтувати.

Якщо тіло, що рухається, дуже невелике порівняно з шляхом його руху, то тіло можна вважати простою точкою, а шлях його руху — прямою або кривою лінією.

Маємо рух точки вздовж лінії.

Рух точки вздовж лінії — це найпростіша форма руху. Його найлегше виміряти й вивчити. Тому з нього найзручніше починати вивчення науки про переміщення тіл, яка називається м е х а н і к о ю. Проте, вивчивши найпростіший рух точки вздовж лінії, можна звести до нього складніші види руху, наприклад рух хвиль по поверхні води або



Різні форми механічного руху: А — розширення газової хмари; Б — обертання кулі навколо її осі; В—рух тіла вздовж лінії.

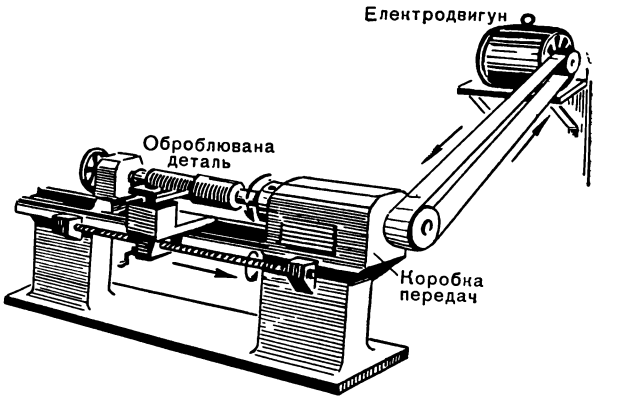


Схема руху деталей токарного верстата. Рухи одного виду переходять в інші.

рух розжарених газів, які викидає двигун космічної ракети.

Хіміки, вивчаючи речовину, розкладають її на найдрібніші частинки — молекули і атоми.

Механіки, вивчаючи переміщення, тобто механічний рух в найскладніших його проявах, розкладають цей рух також на найпростіші його складові частини — на рух безлічі окремих точок.

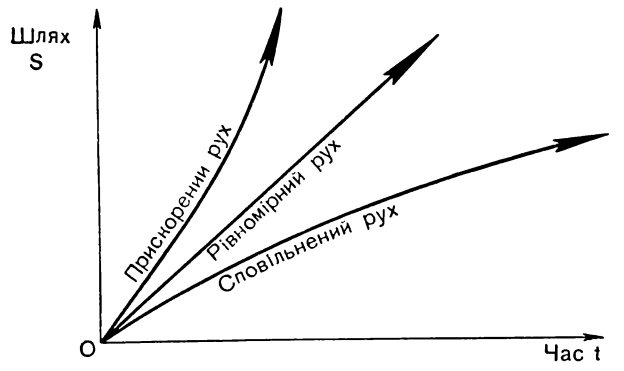
Ось чому рух точки вздовж лінії — таке важливе й потрібне поняття, яке необхідно ретельно вивчати.

РУХ МОЖЕ ПЕРЕХОДИТИ З ОДНИХ ВИДІВ У ІНШІ

Рух різних точок як в природі, що нас оточує, так і в техніці звичайно зв'язаний в єдину систему. При докладнішому вивченні такого руху можна встановити, що рух передається від одних тіл іншим.

Розглянемо, наприклад, роботу хоч би найпростішого токарного верстата, що приводиться в рух електродвигуном за допомогою паса. Ми можемо зразу помітити, що обертання якоря електродвигуна передається віссю шківа. Надітий на цей шків приводний пас рухається складніше.

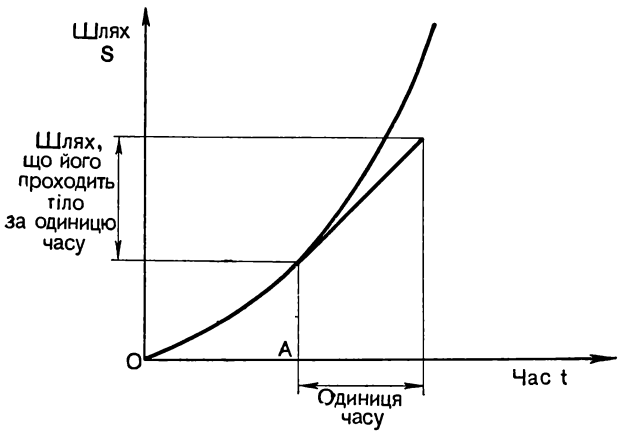
Окремі частини паса, обгинаючи шків електродвигуна, разом із шківом беруть участь в його обертальному русі. Коли частини паса збігають із шківа, вони рухаються прямолінійно. Набігаючи на шків верстата, частини паса знов починають брати участь в обертальному русі.



Залежність шляху s, пройденого тілом при його русі, від часу t. Чим крутіше підіймається на графіку лінія, тим більша швидкість руху.

Обертання шківа через його вісь передається системі шестерень, причому швидкість обертання змінюється, а обертання передається патрону із затиснутою в ньому оброблюваною деталлю. Крім того, обертання передається гвинту, розташованому вздовж станини верстата. На цей гвинт надіта гайка, що входить в супорт верстата. При обертанні гвинта супорт переміщається. Затиснутий в супорті різець рухається вздовж оброблюваної деталі і знімає рівну стружку металу.

Якщо уважно придивитися до роботи верстата, а також і будь-якої іншої машини, то можна помітити, що, яким би складним не був рух найгромізкішої машини, його кінець кінцем можна звести до найпростішого руху окремих точок по прямих і кривих лініях.



Швидкість в момент часу A чисельно дорівнює шляху, який пройшло б тіло за одиницю часу, рухаючись рівномірно.

ШВИДКІСТЬ

Всякий рух, зокрема переміщення вздовж якої-небудь лінії, може бути більш або менш швидким.

Якщо рух дуже повільний, наприклад ріст трави, рух годинникової стрілки, ми його безпосередньо не можемо бачити.

Якщо рух відбувається швидше, він добре помітний. Якщо тіло проходить за кожну секунду від кількох міліметрів до кількох десятків метрів, ми добре бачимо самий рух, і, нарешті, якщо швидкість досягає сотень і тисяч метрів за секунду, то на порівняно близькій відстані (десятки й сотні метрів) він становиться невловимим. З такою швидкістю рухаються, наприклад, кулі й снаряди.

Звичайно, на більшій відстані може здатися, що порівняно повільно рухається навіть тіло, що летить дуже швидко. Наприклад, нам здається, що штучний супутник або його ракета-носій, які проходять на відстані кількох сотень кілометрів від спостерігача, переміщаються досить повільно, незважаючи на те, що вони проходять протягом кожної секунди майже 8 *км*.

Як би там не було, найпростіше можна виразити швидкість руху, вказуючи шлях, який могло б пройти тіло, якби воно рухалось з тією самою швидкістю протягом будь-якої одиниці часу, наприклад години чи секунди.

При цьому зовсім не потрібно, щоб рух відбувався весь час протягом обраної одиниці часу.

Так, якщо автомашина йде з швидкістю, що дорівнює 40 *км* на годину, то це зовсім не значить, що вона обов'язково рухатиметься годину і за цей час пройде 40 *км*. Тут вся справа в тому, що автомашина рухається так, що якби вона йшла рівномірно одну годину, то пройшла б шлях в 40 *км*.

Швидкість є мірою бистроти наростання шляху з бігом часу, тому судити про швидкість можна на підставі того шляху, який був би пройдений, коли б тіло, не змінюючи швидкості руху, рухалось протягом обраної одиниці часу.

Величину швидкості можна одержати, поділивши довжину шляху, пройденого при рівномірному русі, на час, протягом якого цей шлях пройдено. Рівномірним рухом називається такий рух, при якому за будь-які однакові проміжки часу тіло проходить однакові частини шляху.

Тому швидкість виражають звичайно в одиницях, які дістають, поділивши одиниці довжини на одиниці часу. Наприклад, швидкість, що дорівнює 5 кілометрам на секунду, позначаємо так:

$$5\ \frac{\text{кілометрів}}{\text{на секунду}},\ \text{або}\ 5\ км/сек.$$

ШВИДКІСТЬ — ПОХІДНА ШЛЯХУ ПО ЧАСУ

Швидкість визначає рух в кожний даний момент. Якщо, наприклад, простежити за падінням каменя, то можна встановити, що його швидкість безперервно зростає. Отже, якщо ми яким-небудь способом установимо, що в певному місці швидкість падіння дорівнює певній величині, то ця швидкість відповідає рухові тіла лише в даній точці шляху.

Це вимагає докладнішого пояснення. Всякий рух відбувається вздовж якого-небудь шляху. Щоб говорити про рух, треба обов'язково вказати хоч би невелику ділянку шляху, по якому рухається тіло. Проте якщо ми виділимо більш або менш довгу ділянку шляху, то на цій ділянці швидкість змінюється (у випадку падіння — зростає), і не можна говорити про певну швидкість. Як же вийти з цієї суперечності?

Наука встановила такий спосіб розв'язання цієї задачі. Шлях, який проходить тіло, треба розглядати по можливості на короткому відрізку. Точніше кажучи, треба зробити цю довжину такою малою, щоб зміна швидкості стала практично непомітною. Час руху також буде при цьому надзвичайно малим.

Таким чином, можна вважати, що при змінному русі шлях і час руху треба брати гранично малими, меншими за будь-яку величину, яку можна було б вказати. Такий нескінченно малий відрізок, на який збільшується пройдений тілом шлях в розглядуваний нами момент часу, тобто нескінченно малий приріст шляху за нескінченно малий час, називається диференціалом шляху. Нескінченно малий час називається диференціалом часу.

Якщо поділити нескінченно малий приріст шляху на нескінченно малий приріст часу руху, то ми дістанемо швидкість руху, яка точно відповідає справжній швидкості руху в заданій точці шляху.

Якщо одна величина ділиться на іншу, то одержаний результат нерідко називають відношенням. Таким чином, швидкість змінного руху є відношення нескінченно малого приросту шляху до нескінченно малого приросту часу руху.

Одержувана таким способом величина називається похідною шляху по часу.

Ми досить докладно спинилися тут на тому, як визначити швидкість змінного руху. Це потрібно було зробити тому,що швидкість, яка змінюється в часі, можна вважати добрим прикладом найрізноманітніших величин, що змінюються залежно від тих або інших умов. Такі величини дуже часто зустрічаються в науці й техніці, і їх вивчення є основою для виявлення різних законів природи та для використання цих законів на практиці.

Докладному вивченню величин, що називаються диференціалами, присвячено великий розділ математики — диференціальне числення. Докладніше про нього можна дізнатись в статті «Інтеграл і похідна», вміщеній в розділі математики цього самого тома ДЕ.

ПРИКЛАДИ РУХІВ, ЩО МАЮТЬ РІЗНІ ШВИДКОСТІ

Швидкість — це поняття, яке дуже широко застосовується в житті, техніці, науці. Цим же поняттям часто користуються люди, які не вникають докладно в його суть. Практика, проте, показує, що лише при докладнішому вивченні можна скористатися швидкістю як серйозним науковим поняттям.

Наведемо деякі характерні швидкості руху, які зустрічаються в природі й техніці.

Швидкість людини, що йде звичайними кроками, дорівнює приблизно 1 *м/сек*, або 3,6 *км/год*. Людина, що біжить, має швидкість приблизно 5 *м/сек*, або 18 *км/год*.

Сильний вітер — повітря, переміщується з швидкістю від 10 до 20 *м/сек*, або від 36 до 72 *км/год*.

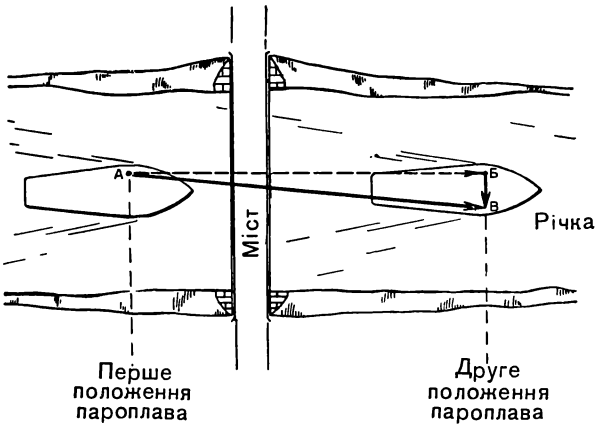
Штучний супутник Землі проходить за секунду 7900 *м* (7,9 *км*), або 28 440 *км/год*.

Космічна ракета, запущена на Марс, повинна відлетіти з Землі з швидкістю 11,59 *км/сек*.

Космічна ракета, що летить до Юпітера, повинна мати швидкість 14,24 *км/сек*.

Така ж ракета, направлена до Сатурна, повинна мати швидкість 15,21 *км/сек*.

Космічна ракета-зірколіт, що повинна зовсім вийти з сонячної системи в міжзоряний



Рух людини на пароплаві (в плані): АБ — швидкість пароплава відносно спостерігача; БВ — швидкість людини відносно пароплава; АВ — швидкість людини відносно нерухомого спостерігача.

простір, повинна мати при відльоті з Землі швидкість, більшу за 17 *км/сек*.

Наведені швидкості космічних ракет подано для такого випадку, коли запуск відбувається на одному з полюсів Землі і ракета летить у той же бік, куди рухається Земля по своїй орбіті.

Швидкість руху Землі навколо Сонця дорівнює приблизно 30 *км/сек*. Найбільша швидкість, відома в природі,— це швидкість поширення світла й радіохвиль. Вона дорівнює 300 000 *км/сек*.

ШВИДКІСТЬ — ВЕКТОР

Швидкість має не тільки величину; вона завжди пов'язана з рухом, що має певний напрям. Тому, щоб цілком визначити характер руху, необхідно не тільки знати величину швидкості, але також і встановити напрям руху.

Щоб наочно зобразити швидкість за таких умов, прийнято малювати стрілку, довжина якої пропорціональна величині швидкості, а напрям указує напрям руху.

Величина, яку можна зобразити у вигляді такої стрілки, називається вектором. Таким чином, з погляду математики, швидкість — це вектор. (Докладніше про вектори та операції над ними розповідається в статті «Геометрична алгебра», уміщеній в розділі математики цього самого тома ДЕ).

ДОДАВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ

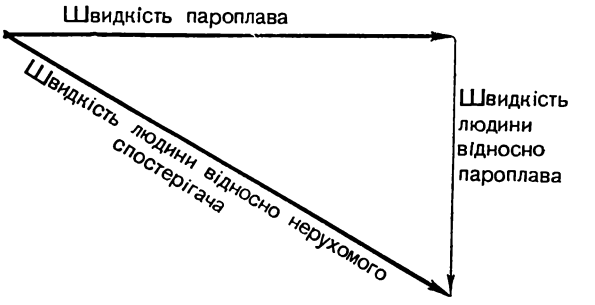
Дуже часто буває так, що тіло має зразу декілька рухів. Наприклад, по річці рухається пароплав, а по його палубі йде людина в напрямі, перпендикулярному до лінії руху пароплава. Якщо на цю людину поглянути з мосту, під яким проходить пароплав, то буде видно, що людина рухається в напрямі, який становить певний кут з лінією руху пароплава.

Яка буде швидкість людини на пароплаві відносно того спостерігача, який дивиться з мосту?

Щоб одержати відповідь на таке запитання, треба намалювати вектор швидкості пароплава і від його кінця у відповідному напрямі відкласти вектор швидкості людини відносно пароплава. Потім треба від початку вектора швидкості пароплава провести пряму лінію до кінця вектора швидкості людини. Ця лінія й буде вектором швидкості людини на пароплаві відносно спостерігача на мосту і взагалі відносно земної кулі. Якщо пароплав рухається з швидкістю 4 *км/год*, а людина йде з швидкістю 3 *км/год* в напрямі, перпендикулярному до лінії руху пароплава, то описана вище побудова приведе до появи прямокутного трикутника. У цього трикутника катетами є швидкість людини відносно пароплава і швидкість пароплава, а гіпотенуза — швидкість людини відносно спостерігача, що стоїть на мосту, і всієї Землі.

Як відомо, за теоремою Піфагора, квадрат гіпотенузи дорівнює сумі квадратів катетів. На цій підставі визначаємо швидкість людини на пароплаві відносно Землі:

$$\sqrt{4^2 + 3^2} = \sqrt{16 + 9} = \sqrt{25} = 5 \text{ (км/год)}.$$



Додавання швидкостей.

З розглянутого прикладу випливає дуже істотний висновок про те, що всяка швидкість може розглядатися тільки по відношенню до якогось тіла, яке ми вважаємо нерухомим.

Наприклад, якщо людина йде по поверхні Землі, то ми звичайно вимірюємо її швидкість відносно Землі. Якщо швидкість цієї людини треба встановити відносно Сонця, то слід додати вектор швидкості людини відносно Землі до вектора швидкості Землі відносно Сонця. Крім того, слід було б врахувати ще швидкість, одержувану внаслідок обертання Землі. При такому додаванні рух людини і навіть обертання Землі мали б мізерне значення, а основне значення мала б швидкість руху Землі по її орбіті навколо Сонця.

ПРИСКОРЕННЯ

В рухові, що в природі й техніці безперервно змінюється, важко знайти такі види руху, які відбувалися б із сталою швидкістю. Швидкість звичайно то збільшується, то зменшується. Вона може також змінювати свій напрям. Всі ці зміни теж треба вимірювати й виражати визначеною мірою.

З цією метою введена величина, яку називають прискоренням. Прискорення — це міра бистроти зміни швидкості, тобто зміна швидкості за одиницю часу (при умові, що за цю одиницю часу швидкість змінюється рівномірно).

Прискорення обчислюється так: зміна швидкості, що вимірюється, наприклад, метрами за секунду (або $\frac{\text{метри}}{\text{секунди}} = м/сек$), ділиться на відповідний час, який вимірюється, наприклад, секундами.

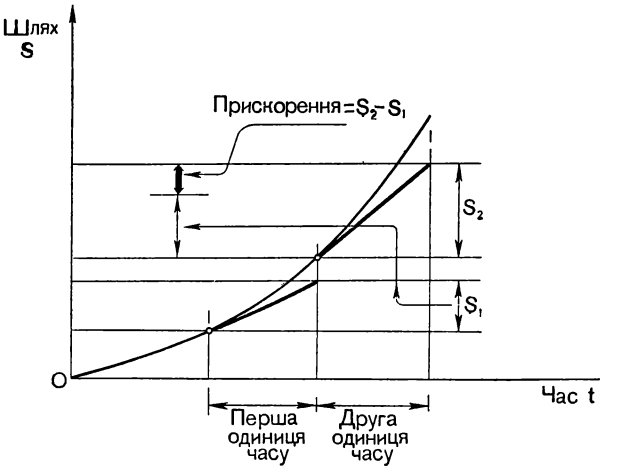
Тому прискорення вимірюється метрами, двічі поділеними на секунди, тобто на секунди в квадраті, або величиною

$$\frac{\text{метри}}{\text{секунди}^2} = м/сек^2.$$

Замість метрів і секунд можуть бути, звичайно, застосовані будь-які інші одиниці довжини й часу.

Зміна швидкості, яку беруть до уваги при розрахунку прискорення, може виникнути не тільки при збільшенні або зменшенні швидкості руху, але й при зміні напряму руху.

Наприклад, якщо напрям змінився на 60°, то це відповідає зміні швидкості на величину, рівну самій швидкості.

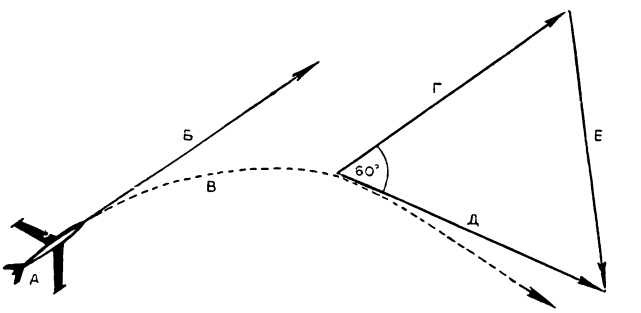


Швидкість по закінченні першої одиниці часу чисельно дорівнює пройденому за цей час шляху (s_1). Швидкість по закінченні другої одиниці часу також чисельно дорівнює шляху, пройденому за цю одиницю часу (s_2). $s_2 - s_1 = a$ — прискорення. Це число дорівнює приросту швидкості за одиницю часу.

Подібно до швидкості прискорення може бути змінним залежно від шляху, який проходить рухоме тіло, і від часу руху.

Беручи до уваги цю обставину, можна про прискорення сказати те саме, що було сказане відносно швидкості змінного руху в розділі цієї статті «Швидкість — похідна шляху по часу».

Можна вважати, що прискорення є відношення нескінченно малої зміни швидкості до нескінченно малого приросту часу. Інакше



Якщо кут повороту літака дорівнює 60°, то зміна швидкості, обумовлена поворотом, за величиною дорівнює самій швидкості (якщо числове значення швидкості не змінилось): А — початкове положення літака; Б—вектор початкової швидкості; В — шлях літака; Г — вектор початкової швидкості, перенесений паралельно самому собі; Д — вектор швидкості після повороту літака; Е — вектор, що зображує зміну швидкості.

кажучи, прискорення — це похідна швидкості по часу.

Тут ми знову зустрічаємося з нескінченно малими величинами — диференціалами, тобто з деякими з тих «цеглинок», з яких будується розділ вищої математики, що називається диференціальним численням.

ЗАКОН ІНЕРЦІЇ

Прискорення — це тому така важлива для науки величина, що вона виражає ступінь дії на рухоме тіло інших тіл. Така дія може відбуватися безпосередньо шляхом стикання або іншими способами.

На підставі численних дослідів установлено, що тіло, яке не піддається жодним впливам, рухатиметься прямолінійно із сталою швидкістю або лишатиметься нерухомим. Цей закон був установлений в XVIII ст. великим англійським ученим Ісааком Ньютоном і називається законом інерції.

СИЛА — МІРА ВЗАЄМОДІЇ

Якщо швидкість тіла змінюється, тобто якщо це тіло має певне прискорення, значить, якась дія змінює рух тіла.

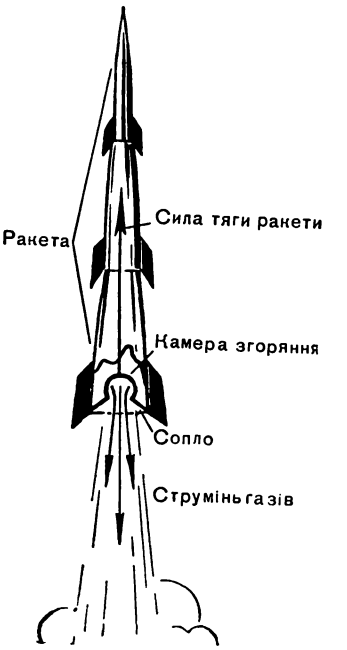
Ось, наприклад, перед нами стоїть на пусковій площадці потужна космічна ракета. Все готове до пуску. Дано сигнал старту. В реактивному двигуні запалили паливо. Розжарені гази вихоплюються з сопла двигуна в нижній частині ракети. Ми бачимо сліпуче яскраве світло, яке дедалі сильнішає... І ось раптом ракета повільно, немовби знехотя поповзла вгору. Із її двигуна вихоплюється вогненний хвіст. Гул наповнює все небо; швидкість ракети безперервно зростає.

Цілком ясно, що є певна причина, яка викликає рух ракети. Цю причину використала людина, що збудувала й запустила ракету. Однак щоб точно і безвідказно керувати рухом ракети, та й взагалі всяким рухом, необхідно не тільки знати причину цього руху, але й уміти точно виразити цю причину певною мірою.

Причиною наростання швидкості ракети є сила тяги її реактивного двигуна. Взагалі сила — це міра впливу, яка може викликати зміну величини швидкості рухомого тіла або зміну напряму його руху.

Отже, для того щоб керувати рухом, треба діяти на рухоме тіло певними силами.

Ракета підіймається вгору тому, що в камері згоряння її двигуна під час горіння виникає високий тиск. Цей тиск перемагає вагу ракети й штовхає її вгору, надаючи їй певного прискорення. Таким чином, сила виникає при взаємодії розжарених продуктів горіння й тіла ракети. Значить, сила — це міра взаємодії тіл. У прикладі з ракетою сила виконує дві дії: по-перше, перемагає вагу ракети; по-друге, поступово збільшує її швидкість.



Ракета рухається вгору під дією сили тиску газів у камері згоряння реактивного двигуна. Вниз із сопла двигуна викидається струмінь газів.

Крім того, сила може виконувати й інші дії. Наприклад, при дії сили відбувається стиснення пружини, згин пружної балки та інші зміни форми й розмірів тіл.

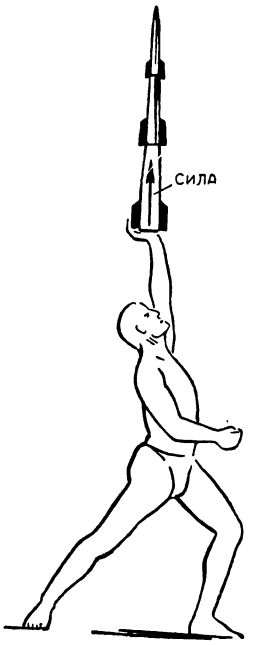
СИЛА, МАСА, ПРИСКОРЕННЯ

Сила — дуже зручне поняття тому, що вона безпосередньо зв'язана з відчуттям, якого зазнає людина, коли діє на різні тіла.

Щоб уявити собі силу, яка рухає ракету, можна трохи пофантазувати. Уяви собі, читачу, що ти велетень і своєю могутньою рукою підняв і кинув ракету в безмежний Космос. Те зусилля, яке ти відчув би при цьому, і дає змогу наочно уявити, що таке сила.

Однак таке наочне уявлення, дуже корисне для першого практичного ознайомлення з силою, недостатнє для того, щоб виміряти силу. Тому треба знайти якийсь спосіб виразити силу певним числом.

Щоб розв'язати цю задачу, звернемося до досліду, який показує, що чим більша сила, яка діє на дане тіло, тим більше й прискорення. Тому будемо вважати, що сила пропорціональна тому прискоренню, яке вона викликає. Можна вважати також, що сила має певний напрям —



Силу тяги ракети можна собі уявити, якщо припустити, що її рух зумовлено діянням людини.

вона напрямлена в той же бік, куди напрямлене прискорення руху тіла.

Звідси виходить, що сила, так само як швидкість і прискорення, є вектором.

Проте сила залежить не тільки від прискорення. Різні тіла складаються з різної кількості речовини. Цю кількість можна назвати масою тіла. Очевидно, що для одержання певного прискорення потрібна тим більша сила, чим більша маса тіла.

Звідси виходить, що сила пропорціональна не тільки прискоренню, але й масі того тіла, яке дістає прискорення.

При цьому, звичайно, не враховується вага тіла й опір його руху, що викликається тертям. Щоб подолати вагу й тертя, потрібна додаткова сила, яку слід ураховувати і вимірювати окремо.

$$Сила = Маса \times Прискорення.$$

Цей закон, також як і закон інерції, був установлений Ньютоном.

ОДИНИЦІ СИЛИ І ОДИНИЦІ МАСИ

Щоб робити різні розрахунки, треба встановити певні одиниці сили та одиниці маси.

За одиницю маси прийнято вважати масу одного літра дистильованої води, взятої при температурі 4° Цельсія.

За одиницю сили беруть силу, з якою кілограм маси притягається до Землі. Ця одиниця називається кілограмом сили.

Для зручності розрахунків часто застосовують технічну одиницю маси *(том)*. Це така маса, якій один кілограм сили надає прискорення, рівне 1 *м/сек*^{2}.

Спостереженнями встановлено, що тіла падають під дією сили тяжіння з прискоренням, рівним 9,81 *м/сек*^{2}. Звідси виходить, що технічна одиниця маси дорівнює 9,81 кілограма маси.

ВСЕСВІТНЄ ТЯЖІННЯ

Ми вже говорили про силу ваги. Ця сила викликана притяганням всіх тіл до Землі. Якщо, наприклад, стоячи на балконі, випустити з руки камінь, то він падатиме вниз під дією сили тяжіння, інакше кажучи, камінь падатиме тому, що його притягає Земля.

У першій половині XVII ст. знаменитий італійський учений Галілео Галілей вперше виміряв прискорення падаючого тіла і встановив, що всі тіла падають з однаковим прискоренням (якщо виключити опір повітря). Це прискорення дорівнює приблизно

$$g = 9{,}81 \text{ } м/сек^2.$$

Інакше кажучи, кожне тіло, що падає вільно, повинне було б до кінця першої секунди набрати швидкості, яка дорівнює 9,81 *м/сек*.

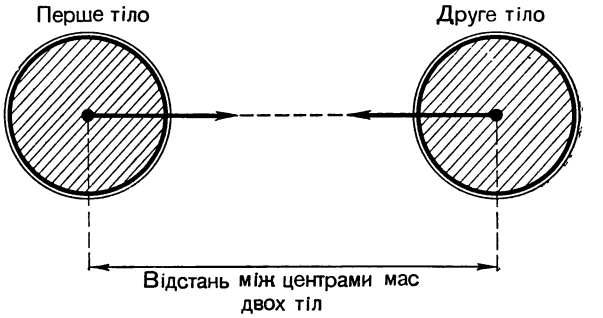
Дуже важливим є те, що всі тіла падають з однаковим прискоренням. Це означає, що сила їх притягання до Землі пропорціональна масі цих тіл.

Ньютон установив, що всі тіла притягаються до Землі, а також одне до одного з силою, пропорціональною їх масам.

Сила тяжіння прикладена до центра маси (або, що те ж саме, до центра ваги тіла). Ньютон установив, що сила взаємного притягання тіл обернено пропорціональна квадрату відстані між центрами їх мас. Цей закон називається законом всесвітнього тяжіння. Його можна записати так:

сила притягання двох мас = сила притягання двох мас, кожна з яких дорівнює одиниці при відстані між їх центрами ваги, що дорівнює одиниці $\times$

$$\times \frac{(\text{маса першого тіла}) \times (\text{маса другого тіла})}{(\text{відстань між центрами ваги})^2}.$$



Взаємне притягання двох тіл.

Сила притягання двох мас, з яких кожна дорівнює технічній одиниці маси, при відстані між їх центрами в 1 *м* дуже невелика. Ми її практично не помічаємо. Але точними приладами цю силу все-таки можна виміряти.

Наприклад, якщо на тонкій пружній нитці підвісити легеньку паличку з масивними кулями на кінцях і наблизити до однієї з куль збоку другу масивну кулю, то за допомогою мікроскопа можна помітити, що паличка ледве-ледве повернеться і кулі трохи наблизяться одна до одної. Це станеться внаслідок взаємного притягання куль одна до одної.

Прилад, подібний до описаного, називається крутильними терезами. За його допомогою можна довести, що будь-які маси притягаються одна до одної, і виміряти силу їх притягання.

Таким способом установлено, що два тіла з масами, рівними (кожна) одній технічній одиниці маси (9,81 *кг* маси), і при відстані між їх центрами ваги, рівній 1 *м*, притягаються одне до одного з силою

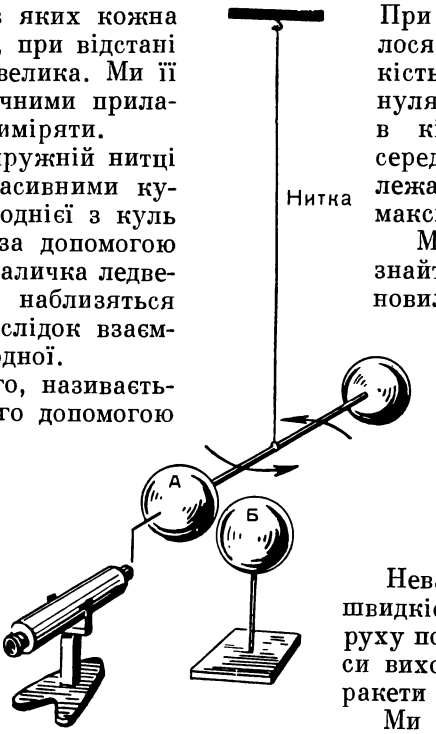
$$\frac{6{,}65}{100\ 000\ 000\ 000\ 000}\ кГ.$$

Ця сила становить приблизно

$$\frac{1}{1\ 500\ 000\ 000}$$

частину ваги тіл, які притягаються. Така мала величина звичайно не має практичного значення. Проте її значення в науці дуже велике. Наприклад, знаючи цю величину, можна дуже просто на основі закону всесвітнього тяжіння визначити масу Землі. Виходячи з маси Землі, можна встановити масу Сонця, Місяця та інших планет.

Так крутильні терези дають можливість «зважувати» небесні тіла.



Крутильний маятник для вимірювання взаємного притягання тіл. Ліворуч — найпростіший вимірювальний мікроскоп; праворуч — стрілками показано напрям повороту крутильного маятника під дією притягання куль А і Б.

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ СИЛИ

Після того як ми розглянули, що таке сила і як вона вимірюється, повернемося до космічної ракети, запуск якої було описано вище.

Спостерігаючи за ракетою за допомогою особливих приладів, можна визначити в різні моменти часу місце її положення і швидкість руху.

Припустимо, що за 100 секунд ракета піднялась вертикально вгору на висоту 150 *км*. При цьому прискорення лишалося сталим. Це значить, що швидкість наростала рівномірно від нуля до найбільшого значення в кінці шляху. Таким чином, середня швидкість руху повинна лежати посередині між нулем і максимальною швидкістю.

Максимальну швидкість можна знайти так. Раніше ми вже встановили, що швидкість рівномірного руху можна дістати, якщо поділити шлях, пройдений рухомим тілом, на час руху. Якби ракета рухалася рівномірно, то її швидкість дорівнювала б

$$\frac{150\ км}{100\ сек} = 1{,}5\ км/сек.$$

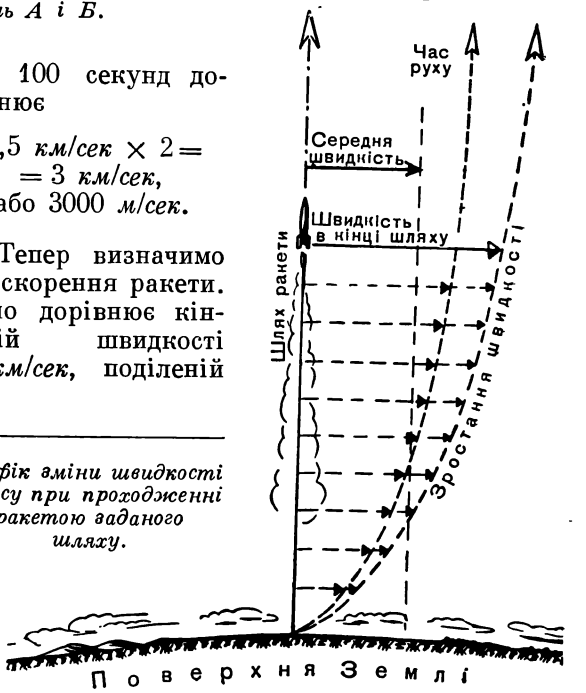
Неважко зміркувати, що середня швидкість і швидкість рівномірного руху повинні бути однаковими. Звідси виходить, що середня швидкість ракети дорівнює 1,5 *км/сек*.

Ми встановили, що швидкість ракети в кінці шляху, який вона пройшла за 100 секунд, вдвічі більша від середньої швидкості. Значить, швидкість ракети через 100 секунд дорівнює

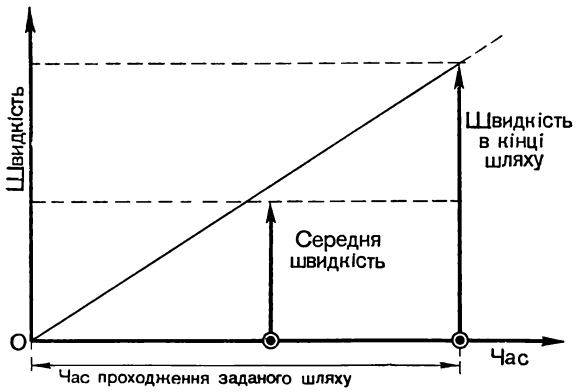
$$1{,}5\ км/сек \times 2 = 3\ км/сек,$$

або 3000 *м/сек*.

Тепер визначимо прискорення ракети. Воно дорівнює кінцевій швидкості 3 *км/сек*, поділеній



Графік зміни швидкості й часу при проходженні ракетою заданого шляху.



Графік зміни швидкості залежно від часу при рівномірному наростанні швидкості. Середня швидкість на заданому шляху дорівнює половині швидкості в кінці шляху.

на час руху. Звідси прискорення ракети дорівнює

$$\frac{3000\ м/сек}{100\ сек} = 30\ м/сек^2.$$

Як приклад вважатимемо, що в момент пуску маса ракети становила 100 000 *кг* (тобто 100 *т*). Щоб виразити масу ракети в технічних одиницях маси, поділимо 100 000 *кг* маси на 9,81 *м/сек²*. Дістанемо наближено 10 200 *том*.

Силу тяги двигуна, що прискорює ракету, дістанемо, якщо помножимо прискорення ракети на її масу. Дістаємо:

10 200 *том* × 30 *м/сек²* = 306 000 *кГ* сили.

До цієї сили необхідно додати ще силу, потрібну для подолання ваги ракети і рівну 100 000 *кГ*.

Тому загальна сила тяги реактивного двигуна при пуску повинна дорівнювати

306 000 *кГ* + 100 000 *кГ* = 406 000 *кГ*, або 406 *Т*.

ДІЯ СИЛ НА БАГАТОСТУПІНЧАСТУ РАКЕТУ

Приклади розрахунків щодо ракети, розглянуті в попередньому розділі, не вичерпують усіх питань, які мимоволі виникають, коли ми докладніше знайомимося з польотом ракети.

Розглянемо деякі з таких питань. Насамперед спинимося на розрахунку сили, що рухає ракету. Як було вже сказано, ця сила викликана тим, що із сопла реактивного двигуна викидається потужний струмінь газів.

Маса газів, що викидаються за одиницю часу — секунду, дорівнює масі палива, спалюваного протягом тієї ж секунди в камері згоряння двигуна. Ця маса називається звичайно витратою палива. Гази викидаються з певною швидкістю, яку звичайно називають швидкістю витікання.

Отже, маса, що дорівнює витраті палива, дістає протягом секунди швидкість витікання. За таких умов ця швидкість витікання виявляється чисельно рівною прискоренню, тому що її дістали за одиницю часу — секунду.

Отже, беручи до уваги, що витрата палива — це зміна маси палива за одну секунду, а швидкість витікання чисельно дорівнює прискоренню, можна написати:

Сила тяги = Витрата палива × Швидкість витікання.

У розглянутому нами прикладі прискорення, надане ракеті, було прийняте сталим на всьому шляху її розгону двигуном. Як було зазначено в попередньому розділі, прискорення ракети дорівнює силі тяги, поділеній на масу ракети.

В масу ракети входить і маса палива. Тому що паливо витрачається, то маса ракети з бігом часу зменшується. Щоб прискорення ракети лишалось сталим, необхідно зменшувати силу тяги, а значить, і витрату палива.

Витрата палива за таких умов повинна завжди бути в певному відношенні до маси ракети (разом з наявним в даний момент паливом).

Звичайно швидкість витікання дорівнює 2,5 *км/сек*, або 2500 *м/сек*.

Визначимо за таких умов витрату палива на початку руху ракети, про яку йшла мова в попередньому розділі.

На основі виведеного нами співвідношення між силою тяги, витратою палива й швидкістю витікання можна визначити витрату палива. Ми дістанемо:

$$Витрата\ палива = \frac{Сила\ тяги}{Швидкість\ витікання}.$$

При такому розрахунку витрату палива дістаємо в технічних одиницях маси за секунду.

В попередньому розділі була визначена сила тяги, яка виявилась рівною 406 000 *кГ*.

Тому

$$Витрата\ палива = \frac{406\,000\ кГ}{2500\ м/сек} = 162\ том/сек.$$

Замінюючи технічні одиниці маси кілограмами маси (1 *том* = 9,81 *кг* маси), дістаємо:

Витрата палива = 1600 *кг/сек.*

Таким чином, ми витрачаємо величезну кількість палива — більше 1,5 *т/сек.*

Ми бачимо, що витрата палива при сталому прискоренні ракети повинна з бігом часу зменшуватися, тому можна вважати, що через деякий час після початку польоту дуже потужний двигун стане вже непотрібним. Крім того, і баки, з яких паливо вже витрачено, теж стають непотрібними. Тому доцільно їх відкинути і таким чином полегшити ракету.

Щоб добитися цього, ракету роблять складеною з декількох ступенів. Кожний ступінь має свої баки з паливом і свій двигун. В міру наростання швидкості ці ступені послідовно відкидаються.

Згідно з розрахунками знаменитого російського вченого К. Е. Ціолковського, найвигідніше використання можливостей багатоступінчастих ракет буде тоді, коли маси окремих ступенів перебувають у певному відношенні одна до одної.

Для прикладу розглянемо ракету, в якій головна частина важить 1 тонну. Ракета-носій повинна надати цій головній частині швидкості, що дорівнює, наприклад, 9 *км/сек.*

За таких умов можна на основі теорії Ціолковського встановити, що ракету доцільно поділити на три ступені.

Перший ступінь надає ракеті швидкості, що дорівнює 3 *км/сек.* Другий збільшує швидкість до 6 *км/сек.* І, нарешті, третій доводить швидкість до 9 *км/сек.*

Виходячи з відомих з радянської та іноземної преси зразків ракет, можна вважати, що маса кожного ступеня повинна бути приблизно в шість раз менша від маси попереднього ступеня.

Якщо йти навпаки, від головної частини ракети, дістанемо таке. Головна частина у нас прийнята з масою, рівною 1 *т.* Прилеглий до неї останній ступінь ракети повинен мати масу 6 *т*, дальший ступінь — 36 *т*, і, нарешті, ще один ступінь повинен мати масу 216 *т.* За таких умов загальна маса ракети становитиме

$$\begin{array}{r} 1 \\ +\,6 \\ 36 \\ 216 \\ \hline 259\ (т). \end{array}$$

Відповідно до цього повинні бути забезпечені величини сили тяги. Ці величини будуть більші, ніж у розглянутому вище прикладі, тому що маса ракети тут вийшла більшою.

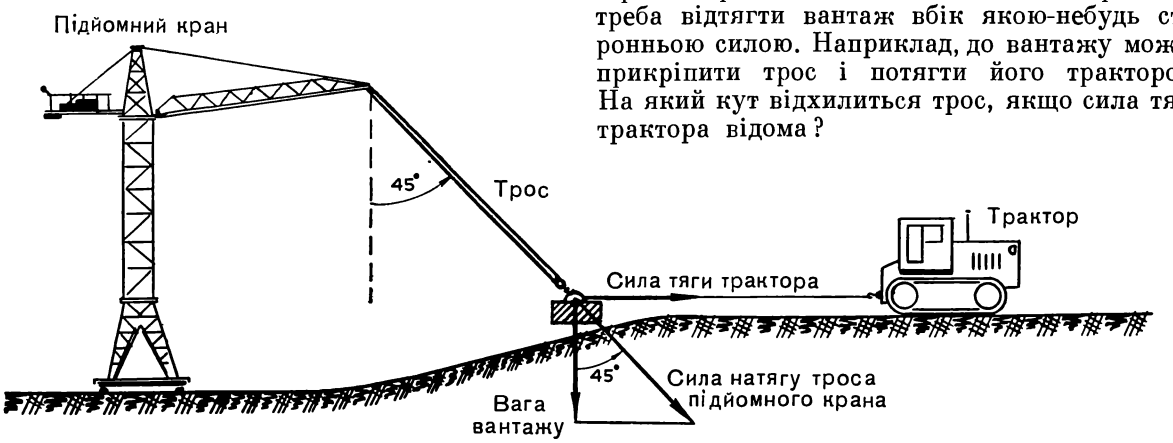
ДОДАВАННЯ СИЛ

Ми бачили вже, що сили — це вектори. Їх можна зображати у вигляді стрілок. Довжина цих стрілок повинна відповідати величині сил, а напрям — указувати, куди діє сила.

Можна, наприклад, вибрати такий розмір стрілок, щоб кожному кілограму сили відповідав 1 міліметр довжини стрілки.

Вектори можна додавати. Це ми бачили вже на прикладі додавання швидкостей. Таким самим способом можна додавати й сили.

Уявімо собі, що кран піднімає вантаж; розглянемо, що треба зробити, якщо цей вантаж треба буде опустити в місце, до якого стрілка крана не досягає. Відповідь проста — треба відтягти вантаж вбік якою-небудь сторонньою силою. Наприклад, до вантажу можна прикріпити трос і потягти його трактором. На який кут відхилиться трос, якщо сила тяги трактора відома?



Дія сили тяги на вантаж, підвішений до підйомного крана.

Щоб розв'язати таку задачу, треба на рисунку зобразити центр ваги вантажу і побудувати з цього центра вниз стрілку, довжина якої відповідає вазі вантажу. Цю стрілку треба напрямити вертикально вниз тому, що сила ваги діє в цьому напрямі. Крім цього, до центра ваги прикладена ще горизонтальна сила тієї ж величини. Щоб додати обидві сили, треба до початку стрілки, що зображає вагу тіла, прибудувати стрілку такої самої величини, напрямлену горизонтально. Потім слід центр ваги сполучити з кінцем горизонтальної стрілки прямою лінією. Ця лінія за напрямом і величиною зображає силу, яка виконує дію, що дорівнює дії обох сил. Тому така сила називається р і в н о д і й н о ю.

Одержана на нашому рисунку рівнодійна нахилена під кутом 45° до вертикалі. Вона повинна натягти троси крана також під таким кутом.

Величина сили, що натягує троси крана, при цьому дорівнює гіпотенузі прямокутного трикутника, катетами якого є вага і горизонтальна сила (що дорівнюють одна одній).

Гіпотенуза за таких умов більша кожного з катетів у $\sqrt{2}$ раз. Якщо, наприклад, вага вантажу 100 *кГ*, то сила, яка натягає трос, дорівнюватиме

$$100 \cdot \sqrt{2} \approx 100 \cdot 1{,}414 \approx 141{,}4 \ (кГ).$$

ДІЯ ДОРІВНЮЄ ПРОТИДІЇ

З розглянутого прикладу видно, що кілька сил, які діють на яке-небудь тіло, можна замінити однією.

Якщо на якесь тіло діють дві сили, рівні за величиною і напрямлені в протилежні сторони, то при додаванні ці сили повинні взаємно зрівноважуватися.

Проте якщо на тіло діє тільки одна сила, яка, наприклад, надає йому прискорення, то ця сила цілком витрачається на це прискорення і надати прискорення якомусь іншому тілу вже не може. Це значить, що тіло, якому сила надає прискорення, виявляє силі опір, рівний цій силі за величиною, але напрямлений в протилежний бік. Це гасить діючу силу.

Ісаак Ньютон на додаток до вже розглянутих законів установив ще один закон: д і ї д в о х т і л о д н е н а о д н е р і в н і з а в е л и ч и н о ю і п р о т и л е ж н і з а н а п р я м о м.

Які б тіла не взаємодіяли, які б не відбувалися зміни їх руху, сила є завжди мірою їх взаємодії; вона виявляється двічі: один раз на одному, а другий раз на іншому тілі.

Ось, наприклад, космічна ракета, яку ми розглядали, рухається вгору, тому що її штовхають вперед розжарені гази в камері двигуна. Але разом з тим ці гази викидаються через сопло двигуна назад у вигляді довгого вогняного струменя. Отже, на них діє сила, протилежна силі, що штовхає ракету, бо вони рухаються в бік, протилежний її рухові. Обидві ці сили — прояв однієї і тієї ж самої взаємодії газів з ракетою.

ІМПУЛЬС СИЛИ І КІЛЬКІСТЬ РУХУ

Всяка сила діє протягом певного часу. Наприклад, тепловоз або електровоз повинен деякий час тягти состав вагонів, перш ніж поїзд досягне заданої швидкості.

Отже, дія сили, яку називаємо імпульсом сили (або просто імпульсом), тим більша, чим більша сила і чим більший час її дії.

Імпульс сили виражають у вигляді добутку сили на час її дії.

Результат поступової дії сили — надання якому-небудь тілу певної швидкості. Чим більша маса тіла та його швидкість, тим значніше саме явище руху. Звичайно кількість руху виражають як добуток маси на швидкість її руху.

На основі дуже простих розрахунків можна вивести, що *імпульс сили* дорівнює *кількості руху*, або

$$Сила \times Час = Маса \times Швидкість.$$

Справедливість останньої рівності дуже легко довести на основі закону Ньютона про зв'язок сили й прискорення. А саме: ми бачили, що

$$Сила = Маса \times Прискорення.$$

Звідси виходить, що попередню рівність можна переписати так:

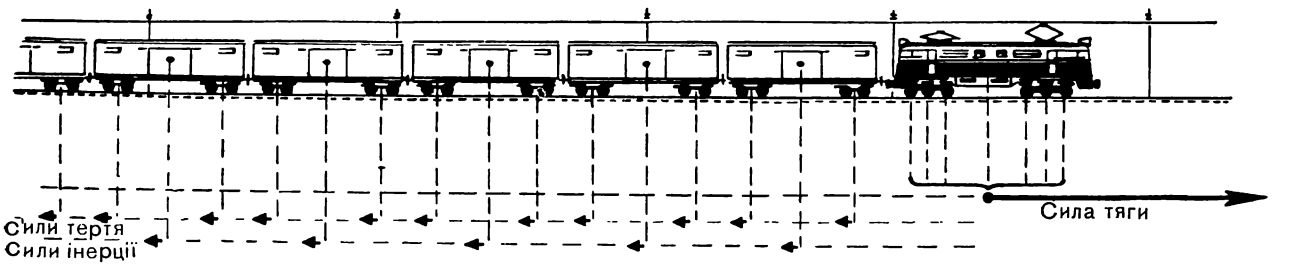
$$Маса \times Прискорення \times Час = Маса \times \times Швидкість.$$

Якщо врахувати, що в лівій частині останньої рівності

$$Прискорення \times Час = Швидкість,$$

то матимемо, що ліва частина дорівнює правій. Таким чином, права і ліва частини рівності тотожно дорівнюють одна одній.

Рівність імпульсу сили кількості руху дає змогу дуже зручно розв'язувати багато задач.



При прискореному русі поїзда сила тяги електровоза дорівнює сумі всіх сил тертя й сил інерції.

Ось, наприклад, електровоз починає свій рух і тягне поїзд. При цьому він за дві хвилини надає поїзду швидкості, що дорівнює 36 *км/год*. Необхідно за таких умов визначити середню силу тяги електровоза.

Маса поїзда 4000 *т*. Сила тертя коліс об рейки дорівнює в цьому випадку приблизно 30 *Т*. Електровоз повинен дати значнішу силу тяги, щоб розігнати поїзд до заданої швидкості.

Перетворимо швидкість поїзда в метри за секунду, враховуючи, що година має 3600 сек. Дістанемо:

$$36\ км/год = \frac{36\,000\ м}{3600\ сек} = 10\ м/сек.$$

Визначаємо масу поїзда в технічних одиницях:

$$4000\ т = 4\,000\,000\ кг \quad маси = \frac{4\,000\,000\ кг}{9{,}81\ кг/том} = 410\,000\ том.$$

Кількість руху дорівнює

$$410\,000\ том \cdot 10\ м/сек = 4\,100\,000\ том \times м/сек.$$

Відповідний імпульс сили тяги електровоза, який прискорює поїзд, дорівнює:

$$Сила \times Час = Сила \times 120 \text{ сек.}$$

Згідно з рівністю імпульсу сили, кількість руху можна написати:

$Сила \times 120$ сек. $= 4\,100\,000\ том \cdot м/сек$,

звідси:

$$Сила = \frac{4\,100\,000\ том \cdot м/сек}{120 \text{ сек.}} = 34\,200\ кГ,$$

або 34,2 *Т*.

Згадаймо, що, крім цього, витрачалась сила в 30 *Т* на подолання тертя коліс під час руху по рейках. Тому загальна сила тяги електровоза становить:

$$30Т + 34{,}2\ Т = 64{,}2\ Т = 64\,200\ кГ.$$

РОБОТА І ЕНЕРГІЯ

Імпульс сили не завжди може визначити ті зміни й переміщення, які робить сила.

Ось, наприклад, на рейках стоїть вагон з вантажем, який важить 64 *Т*. Вага цього вагона дорівнює якраз силі тяги електровоза, розрахунок якої ми зробили в попередньому прикладі. Але ця вага не робить жодних істотних переміщень. Уважний спостерігач міг би тільки помітити, що під тиском коліс вагона дуже небагато осіли рейки і шпали трохи вдавилися в шар баласту.

Звичайно, ці переміщення ні в яке порівняння не можуть іти з тим рухом, якого надавала така сама сила поїзду, коли ця сила діяла у вигляді тяги електровоза. Вагон може стояти на місці не тільки дві хвилини, за які електровоз розганяв поїзд, але навіть два десятки років, і наслідок дії сили буде таким самим.

Із цього прикладу видно, що імпульс сили не завжди визначає ті переміщення, які може виконати сила.

Щоб визначити результат дії сили, треба врахувати те переміщення, що його ця сила виконала.

Такий результат називається р о б о т о ю с и л и. Робота, очевидно, тим більша, чим більша сила й чим більше переміщення, викликане цією силою. Тому приймається, що робота дорівнює добутку сили на шлях:

$$Робота = Сила \times Шлях.$$

Відповідно до цього одиниці для вимірювання роботи дістаємо шляхом перемноження одиниць сили на одиниці шляху. Широко розповсюдженою одиницею вимірювання роботи є к і л о г р а м о м е т р. Можуть бути також застосовані тонна-метри або тонна-кілометри. Тому що тонна в 1000 раз більша від кілограма, а кілометр в 1000 раз більший від метра, то тонна-кілометр — це величина, в мільйон раз більша від кілограмометра.

Тут треба зауважити, що тонна-кілометр як одиницю роботи не слід плутати з тонна-кілометрами, якими виражають роботу транспорту, помножаючи вагу перевезених вантажів на відстань їх перевозки. Чому в цьому випадкові ми не дістаємо роботи? Тому, що робота — це добуток сили на шлях, пройдений у напрямі дії сили. А при розглянутому нами обліку роботи транспорту вага вантажів діє вертикально, а вантажі переміщуються майже в точно горизонтальному напрямі.

Щоб правильно обчислити механічну роботу, витрачувану на транспорті, треба силу тяги помножити на пройдений шлях.

У прикладі з електровозом і поїздом швидкість за 2 хвилини зросла від 0 до 10 *м/сек*. Отже, середня швидкість дорівнювала 5 *м/сек*. За 2 хв. (або 120 сек.) поїзд пройшов

$$5\ м/сек \times 120\ \text{сек.} = 600\ м.$$

Робота, витрачена електровозом, дорівнює за таких умов:

$$64\,200\ кГ \times 600\ м = 38\,520\,000\ кГм,$$

або 38,52 тонна-кілометра.

Іноді роботу вимірюють іншою одиницею — кіловат-годиною *(квт-г)*.

Розрахунками встановлено, що

$$1\ квт\text{-}г = 360\,720\ кГм.$$

Звичайно кіловат-година застосовується як електрична одиниця, тому може викликати здивування те, що ми застосували її для вимірювання механічної роботи.

Щоб розібратися в цьому питанні, треба сказати, що робота ніколи не може виникати поза зв'язком з іншими видами руху.

Електровоз тільки тому міг тягнути поїзд, що він живився електричним струмом. Можна сказати, що цей електричний струм передав електродвигунам електровоза відповідну здатність здійснити роботу. Тільки тому електровоз і виконав роботу насправді. Звідси виходить, що механічну роботу по суті можна вимірювати й електричними одиницями.

Не завжди поїзди водять електровози. Застосовуються для цієї мети також паровози і тепловози.

В топці паровоза спалюють звичайно кам'яне вугілля, а в двигунах тепловоза — нафтове паливо. Отже, вугілля й нафта мають в собі також якийсь «запас роботи», який звільняється при їх згорянні спочатку у вигляді теплоти, а потім переходить в механічну роботу. (Докладніше про це див. в статті «Фізичні принципи роботи теплових машин»).

Здатність тіла виконувати роботу визначається його енергією. Отже, енергія — це захована в тій або іншій формі здатність тіла виконувати роботу.

ПОТУЖНІСТЬ

Для виконання механічної роботи дуже часто застосовують різні двигуни. Призначення двигуна полягає в тому, щоб перетворювати в роботу якийсь вид енергії. Наприклад, двигун автомашини перетворює в роботу ту енергію, яка захована в молекулах бензину. Цей бензин спалюють в циліндрах двигуна. Утворений при спалюванні розжарений газ з великою силою тисне на поршень, що є в циліндрі, і переміщає його. Рух поршня передається через систему механізмів колесам автомашини. Таким чином, ми маємо тут ряд перетворень енергії: спочатку хімічна енергія палива переходить у теплоту, потім теплота перетворюється в механічну роботу. Ця робота передається від вала двигуна через різні механізми (коробка швидкостей, кардан, задній міст) колесам автомашини.

Характерною особливістю кожного двигуна є його здатність виконувати задану роботу в певний час. Звичайно двигун оцінюють за його потужністю. Потужністю називають роботу, виконувану двигуном за одиницю часу.

Можна написати:

$$Потужність = \frac{Робота}{Час}.$$

Потужність можна вимірювати кілограмометрами за секунду.

Часто для вимірювання потужності застосовують такі одиниці:

1 кінська сила $= 75\ кГм/сек$,
1 кіловат $= 102\ кГм/сек$.

Раніше ми з'ясували, що робота дорівнює силі, помноженій на шлях. Тому можна написати:

$$Потужність = Сила \frac{Шлях}{Час}.$$

Ми знаємо, що шлях, поділений на час, — це швидкість. Отже,

$$Потужність = Сила \times Швидкість.$$

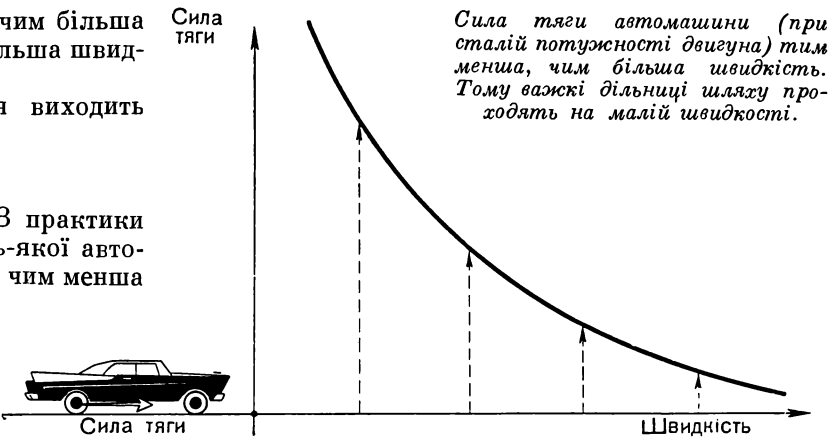
Одержаний результат зрозумілий і без особливих розрахунків. Очевидно, потужність дви-

гуна повинна бути тим більша, чим більша сила, яка викликає рух, і чим більша швидкість цього руху.

З наведеного співвідношення виходить також:

$$Сила = \frac{Потужність}{Швидкість}.$$

Це дуже важлива рівність. З практики добре відомо, що сила тяги будь-якої автомашини або трактора тим більша, чим менша швидкість їх руху при повному числі обертів двигуна за одиницю часу. Щоб забезпечити різні швидкості руху при повному числі обертів двигуна за одиницю часу, тобто при повній потужності, роблять коробку швидкостей.



Сила тяги автомашини (при сталій потужності двигуна) тим менша, чим більша швидкість. Тому важкі дільниці шляху проходять на малій швидкості.

Коробка швидкостей має систему шестерень, які можна з'єднувати по-різному і таким способом змінювати швидкість руху, не змінюючи числа обертів двигуна за одиницю часу.

Чим гірша дорога або чим важчий вантаж треба везти, тим більше знижують швидкість автомашини або трактора і тим значнішу силу тяги вони розвивають.

Кількість цих прикладів можна збільшувати майже безмежно, якщо розглядати роботу найрізноманітніших машин, а також якщо спостерігати сили, які діють у навколишній природі. Але вартим уваги є те, що, які б не були різноманітні й несхожі одне на одне окремі явища, такі поняття, як сила, енергія, робота, потужність, можна застосовувати скрізь. Тут виявляється єдність у русі навколишньої матерії. З цієї єдності випливає можливість використання в науці єдиних способів розв'язування дуже відмінних задач, зокрема визначення сили, роботи, енергії.

ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Розглянуті приклади переконують нас в тому, що енергія може переходити з одних форм в інші. Всякий вид енергії повинен мати якесь джерело. Це означає, що енергія не може виникати з нічого. Проте таке твердження хоч і незаперечне, але все ж є неповним, незакінченим.

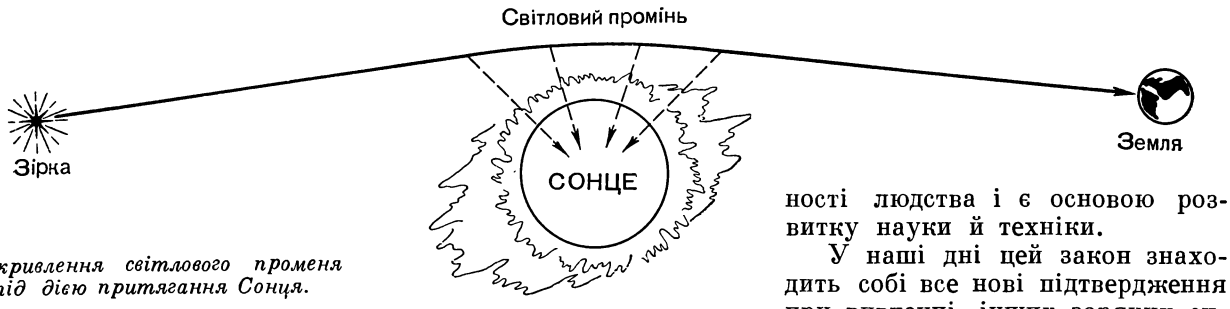
Справа в тому, що енергія не тільки не може виникати з нічого, але не може і зникати безслідно. В прикладі з поїздом енергія, витрачена на рух поїзда, пішла на подолання тертя коліс об рейки та осей у підшипниках. Це тертя викликало деяке нагрівання коліс, рейок, осей і підшипників. Крім того, енергія пішла на стрясання грунту, яке привело до невеликого нагрівання грунту. Певна частка загальної енергії пішла на подолання опору повітря, що трохи нагріло повітря.

З цього видно, що частина роботи електровоза перейшла в теплоту.

Друга частина роботи перейшла в енергію руху поїзда, яку називають кінетичною енергією. Цей вид енергії запасений в рухомій масі. Якби ми хотіли зупинити рух, ми повинні були б перевести кінетичну енергію в якийсь інший вид енергії. Найпростішим способом розв'язання такої задачі є гальмування. Якщо ми хочемо зупинити поїзд, треба привести в дію гальма. Гальма затискують обід колеса або особливий диск, укріплений на осі, і створюють велику силу тертя. Крім того, колеса при гальмуванні сповільнюють своє обертання і частково ковзають по рейках. Все це викликає виділення теплоти. В цю теплоту перетворюється енергія руху, і поїзд повільно зупиняється.

Можливе також і електричне гальмування, при якому електродвигуни електровоза переключаються так, що стають генераторами електричного струму. Тоді енергія руху поїзда іде на обертання цих генераторів, і поїзд зупиняється, віддаючи свою енергію у вигляді енергії електричного струму, що йде в мережу електрифікованої залізниці.

З усього сказаного видно, що енергія не тільки не виникає з нічого, але й не зникає безслідно. Енергія може переходити з одних форм в інші, переходити від одних тіл до інших, але загальна її кількість не може змінюватися ні за яких умов. Цей закон відкрили в XIX ст. Роберт Майєр і Гельмгольц, а поглиблене філософське трактування цього закону дав Енгельс. Називається цей закон законом збереження й перетворення енергії.



Викривлення світлового променя під дією притягання Сонця.

ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ МАТЕРІЇ

Закон збереження енергії — це окремий випадок більш загального закону збереження матерії. Як відомо, матерією називається в цілому все те, що існує незалежно від нашої свідомості.

Ми вже встановили раніше, що матерії властивий рух. Цей рух може бути дуже різноманітним, але, незважаючи на таку різноманітність, є можливість виразити цей рух найзагальнішою мірою. З цією метою можна використати таке поняття, як енергія.

Енергія є однією з основних кількісних характеристик матерії.

Другою не менш важливою характеристикою матерії є маса. Маса визначає собою здатність матерії зберігати рух, що є в ній, а також і силу взаємного притягання окремих тіл. Подібно до закону збереження енергії існує також і закон збереження маси.

Цей закон вперше був відкритий в середині XVIII ст. геніальним російським ученим Михайлом Васильовичем Ломоносовим і вперше викладений ним в листі до академіка Леонарда Ейлера.

Якщо виділити цілком ізольовану систему тіл, то за всіх умов загальна енергія і загальна маса цих тіл лишаються зовсім незмінними.

В цьому полягає закон збереження матерії: матерія вічна, і її кількість у Всесвіті незмінна. Матерія не може зникнути безслідно або виникнути з нічого.

Закон збереження матерії — основний закон природознавства. Цей закон — одна з головних основ матеріалістичного розуміння світу. Він підкріплений всім досвідом практичної діяльності людства і є основою розвитку науки й техніки.

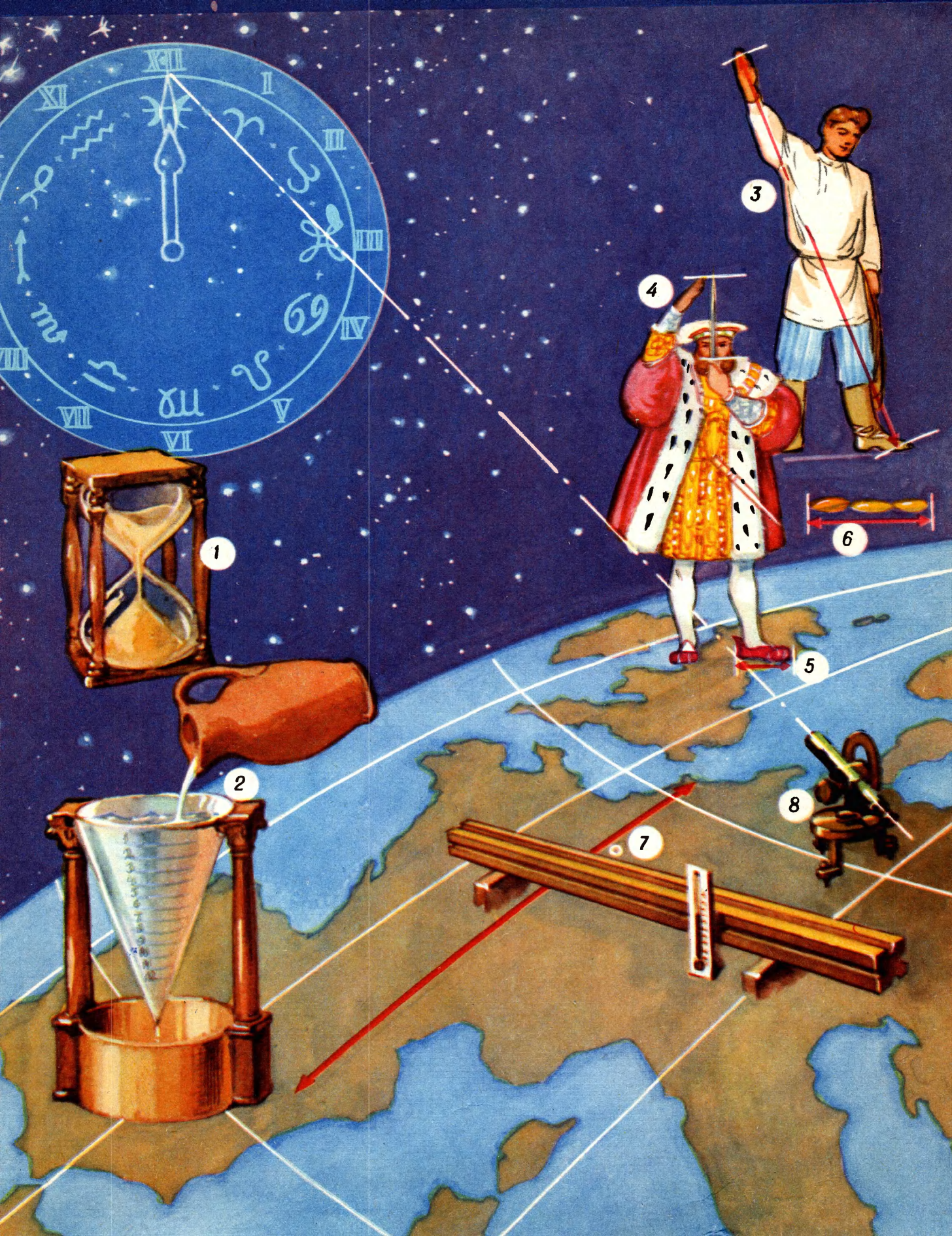
У наші дні цей закон знаходить собі все нові підтвердження при вивченні інших зоряних систем, з яких складається весь видимий Всесвіт.

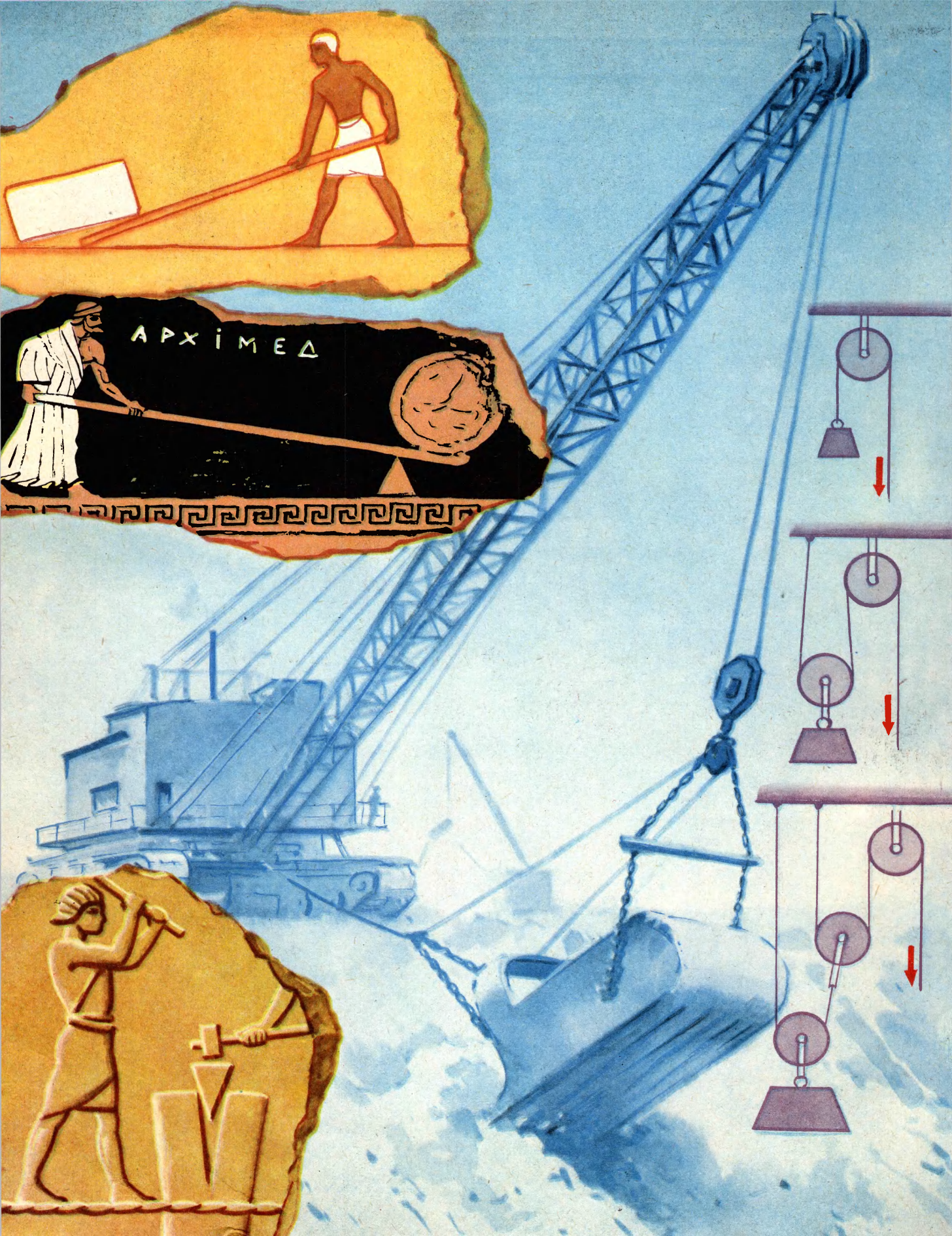
Крім цього, слід мати на увазі, що маса і енергія не можуть існувати незалежно одна від одної. Якщо від одного тіла іншому тілу передається енергія, то разом з цією енергією передається завжди й деяка маса. Кількість маси, передавана таким способом, може бути різною. Однак при передачі певної кількості енергії кількість передаваної маси не може бути менша від цілком певної величини. Ця величина була вперше встановлена на початку XX ст. знаменитим ученим Альбертом Ейнштейном. Найменша маса, передавана разом з певною кількістю енергії, дорівнює переданій енергії, поділеній на квадрат швидкості світла в пустоті. Швидкість світла дорівнює округлено 300 млн. *м/сек*. Квадрат цієї швидкості дорівнює $9 \cdot 10^{16}$.

При діленні на таку величину звичайно дістаємо дуже невелику масу. Проте ця маса не завжди близька до нуля. Наприклад, маса, перенесена енергією вибуху атомної бомби середнього калібру, дорівнює приблизно 1 *г*.

Із сказаного видно, що будь-який носій енергії повинен підлягати закону всесвітнього тяжіння, навіть промені світла. Дуже точними спостереженнями встановлено, що промені зірок, проходячи поблизу Сонця, трохи викривляються. Інакше кажучи, частинки світла, фотони, що летять із швидкістю світла, мають масу й притягаються до Сонця відповідно до закону всесвітнього тяжіння, який ми вже розглянули в цій статті, ознайомлюючись з різними видами сил. В цьому виявляється разюча єдність і взаємозв'язок дуже відмінних видів матерії.

Таблиця 6. З давніх часів людині доводиться вимірювати відстані, предмети, проміжки часу. З розвитком науки й техніки вдосконалювались методи вимірювання та вимірювальні прилади. Деякі прилади й еталони, які здавна застосовувались для вимірювання часу й відстаней, показано на цьому рисунку: *1*. Пісковий годинник. *2*. Водяний годинник. *3*. Косий сажень. *4*. Ярд. *5*. Фут. *6*. Дюйм. *7*. Паризький меридіан та еталон метра. *8*. Початок зоряної доби визначають при проходженні зірки через меридіан.


1
2
3
4
5
6
7
8


ΑΡΧΙΜΕΔ

ШВИДКІСТЬ СВІТЛА — ЦЕ ГРАНИЧНА ШВИДКІСТЬ БУДЬ-ЯКОГО РУХУ

Якщо яка-небудь сила діє на якусь масу і надає їй певної швидкості, то ця маса не може залишатися сталою. Як ми вже бачили на прикладі з поїздом, рухома маса має енергію руху, або кінетичну енергію. Отже, сила, збільшуючи швидкість маси, передає їй певну енергію. Але ми встановили в попередньому розділі, що не можна передавати масі енергії, не передаючи деякої додаткової маси. Звідси виходить, що при збільшенні швидкості руху маса рухомого тіла повинна збільшуватись.

На перший погляд це може здатися неймовірним. Як може збільшуватись маса тіла при збільшенні швидкості руху, якщо саме тіло лишається незмінним? Наприклад, як може збільшитися маса літака, який летить, порівняно з масою нерухомого літака?

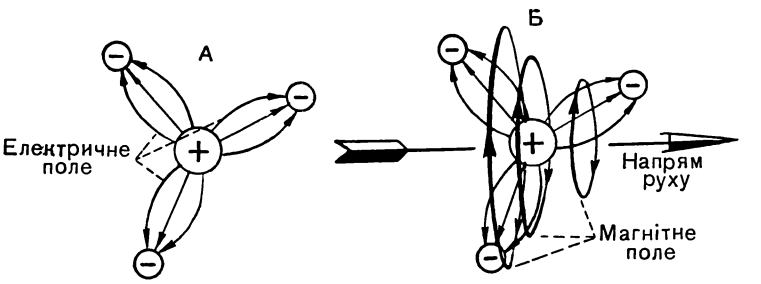
Відповідь на таке питання вимагає проникнення в найтонші деталі будови речовини. Можна розглянути, зокрема, такий приклад. Відомо, що будь-яке тіло складається з найдрібніших частинок — молекул та атомів. Атоми в свою чергу побудовані з атомних ядер та електронів.

Атомні ядра заряджені позитивною електрикою, а електрони — негативною. Між позитивними і негативними електричними зарядами є простір, в якому діють електричні сили. Цей простір називається електричним полем. Він заповнений електричними силовими лініями. Електричне поле являє собою особливу форму матерії.

Якщо електричне поле або заряд переміщуються, то навколо них з'являються нові сили, названі магнітними; їх охоплює магнітне поле, що при цьому виникає.

Чим швидший рух атомів, тим сильніші виникаючі в них магнітні поля. Магнітне поле — це теж особливий вид матерії, що має, як і всяка інша матерія, певну масу. Якщо тіло збільшує швидкість, то в його атомах зростають магнітні поля і за рахунок цього збільшується маса тіла.

Дослідами й розрахунками встановлено, що маса магнітного поля дорівнює енергії, вміщеній в цьому полі, поділеній на квадрат швидкості світла. Таким чином, маса магнітного поля дорівнює тій найменшій масі, яку потрібно передати тілу при передачі йому енергії. Тут-то і здійснюється закон збереження маси — скільки маси передано цьому тілу, настільки маса його й збільшиться.



Під час руху маса атома збільшується тому, що виникає магнітне поле, яке має масу, що дорівнює енергії руху, поділеній на квадрат швидкості світла.

Звідси стає ясним, чому маса рухомих тіл збільшується при збільшенні швидкості. Звідси також випливає, що, для того щоб надати якомусь тілу певного прискорення, треба в міру зростання швидкості безперервно збільшувати силу.

Якщо швидкість тіла наближається до швидкості світла, то маса тіла повинна була б зрости до нескінченності. Що це означає?

Це означає, що дальше прискорення стає неможливим і швидкість світла є границею швидкості всякого руху. Ми бачили вище, що прискорення прямо пропорціональне силі і обернено пропорціональне масі. Якщо маса, зростаючи, прямує до нескінченності, то прискорення зменшується до нуля.

Таким чином, механіка дуже великих швидкостей повинна будуватися з урахуванням зміни маси тіл при зростанні їх швидкості. При невеликих швидкостях зміни маси не враховують. Звичайно механіку, в якій зміна маси під час руху не враховується, називають класичною механікою. Ця механіка знайшла широке застосування в техніці.

Механіка, в якій враховано зміну маси, розглянуту нами, називається релятивістською механікою, тобто заснованою на теорії відносності (висунутій Ейнштейном). Ця теорія вперше встановила, що

Таблиця 7. Прості машини — важелі, клин, блоки — винайдені людиною в далекій давнині. Ними користувались ще на будівництві єгипетських пірамід. Але й в наші дні вони не втратили свого значення: важелі, клин, блоки є елементами найскладніших механізмів нашого часу.

маса тіла при зростанні його швидкості збільшується.

Релятивістська механіка має величезне значення для різних галузей науки й техніки.

В безмежних просторах Космосу рухаються зірки, газові хмари і маси космічного пилу. Крім того, космічний простір пронизують елементарні частинки. Всі ці тіла рухаються з різними швидкостями. В деяких випадках швидкості досягають колосальних величин. Тому рух тіл в Космосі і взагалі всі явища, спостережувані в безкрайньому космічному просторі, було б зовсім неможливо зрозуміти без релятивістської механіки. Таким чином, релятивістська механіка — одна з основ сучасної астрономії та астрофізики (фізики зірок).

Не менше значення має релятивістська механіка і для розуміння будови й руху елементарних частинок, що утворюють речовину. В теперішній час особливого значення набуває вивчення атомних ядер. Це вивчення зв'язане з добуванням величезних кількостей енергії при розщеплюванні й синтезі атомних ядер. Тут таяться незліченні можливості для енергетики майбутнього. Це одна з головних проблем природознавства. Вся вона грунтується на релятивістській механіці і без неї не могла б навіть виникнути.

В наш час вивчення елементарних частинок значною мірою грунтується на тому, щоб діяти на них ударом інших частинок. Для цього застосовують особливі прилади — прискорювачі елементарних частинок (бетатрони, циклотрони, синхрофазотрони і т. д.). Всі ці прилади можна розрахувати й побудувати, тільки використовуючи принципи релятивістської механіки. Якщо півстоліття тому релятивістська механіка була спеціальною, абстрактною галуззю теоретичної фізики, то тепер вона стала основою широких галузей природознавства й техніки, зокрема всієї атомної енергетики майбутнього.

ЗВУК І УЛЬТРАЗВУК

ЗВУК

ПРУЖНІСТЬ ПОВІТРЯ

Найрізноманітніші звуки наповнюють навколишній світ, а тиша буває порівняно рідко. Абсолютна тиша настає лише тоді, коли органи слуху — вуха — перестають сприймати звук.

Але що саме сприймаємо ми як звук?

Відповідь на це питання дає вчення про звук — акустика, одна з галузей фізики. Як і всяка наука, вона склалася поступово і входить своїм корінням в далеке минуле.

Раніше за все було помічено, що звуки породжуються тілами, вібруючими в повітрі. Арістотель вважав, що звучащі тіла створюють попеременне стиснення й розрідження повітря. Таким чином, перший висновок, який було зроблено при вивченні природи звуку,— це зв'язок звуку з повітрям, з атмосферою, яка оточує Землю. І цей здогад був правильний.

Якщо тіло, звучаще в повітрі, помістити в безповітряний простір, воно перестає звучати. Тому, щоб з'ясувати собі процес утворення звуків, треба докладніше ознайомитися з деякими властивостями повітря.

Ми спинимося на властивості повітря, яка має безпосереднє відношення до виникнення й поширення звуку. Ця властивість — пружність.

Те, що повітря має пружність, вчені встановили давно. Проте довго лишалося неясним, через що воно має цю властивість.

Рідини здатні передавати тиск однаково в усі сторони, тому що вони практично нестисливі. Але повітря! Воно таке піддатливе! Чому ж і воно передає тиск цілком так само, як рідина?

Вивченням пружних властивостей повітря займалось багато вчених — Торрічеллі, Паскаль, англійський фізик Роберт Бойль, француз Маріотт. Вони зробили немало важливих відкриттів у цій галузі, але причини пружності повітря їм встановити не вдалось. Це зробив великий російський учений Михайло Васильович Ломоносов.

Виходячи з того, що повітря являє собою суміш різних газів, що складаються з частинок речовини — атомів, Ломоносов прийшов

до висновку, що кожен газ зокрема і суміш газів в цілому мають пружність тому, що їх атоми весь час перебувають у русі. Пояснюючи цю думку, Ломоносов писав:

«Властивість пружності виявляють не окремі частинки, що не мають будь-якої фізичної складності й організованої будови, але утворює сукупність їх».

При цьому, продовжуючи свої міркування, Ломоносов твердив, що сила пружності обумовлена *взаємодіянням частинок між собою*:

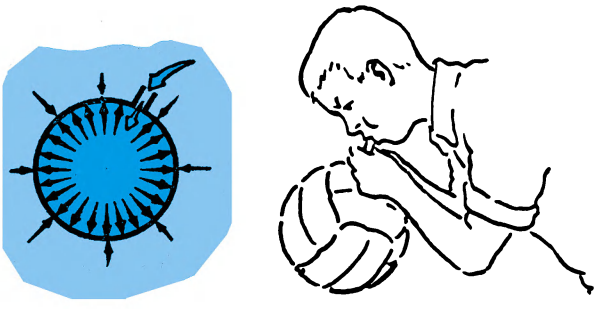
«Тому що ця сила за інших рівних умов збільшується й зменшується щодо густини власної матерії повітря, то немає сумніву, що вона походить від якоїсь безпосередньої взаємодії атомів».

Міркуючи над взаємодією частинок повітря, Ломоносов не випускав з уваги того, що повітря можна стискувати, а це означає, що між частинками існують значні відстані і, отже, вони діють одна на одну, коли стикаються. Час зіткнення, як вважав Ломоносов, триває дуже недовго.

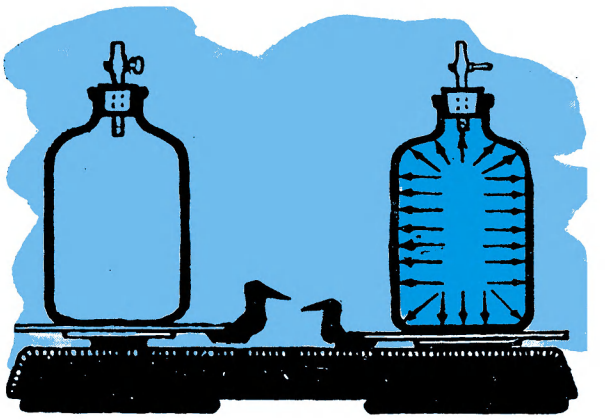
Про це він пише так:

«Очевидно, що окремі атоми повітря, взаємно наблизившись, стикаються з найближчими в невідчутні моменти часу, і, коли вони перебувають в зіткненні, інші атоми один від одного відстрибнули, ударились в ближчі до них і знов відскочили; таким чином, безперервно відштовхувані один від одного частими взаємними поштовхами, вони намагаються розсіятися у всі сторони».

Ці висновки Ломоносова допомогли з'ясувати загальну «поведінку» атмосфери. Повітря — суміш газів. Молекули газів перебувають у безперервному хаотичному русі. Якби



Гумова камера м'яча стає пружною після того, як її наповнять повітрям.

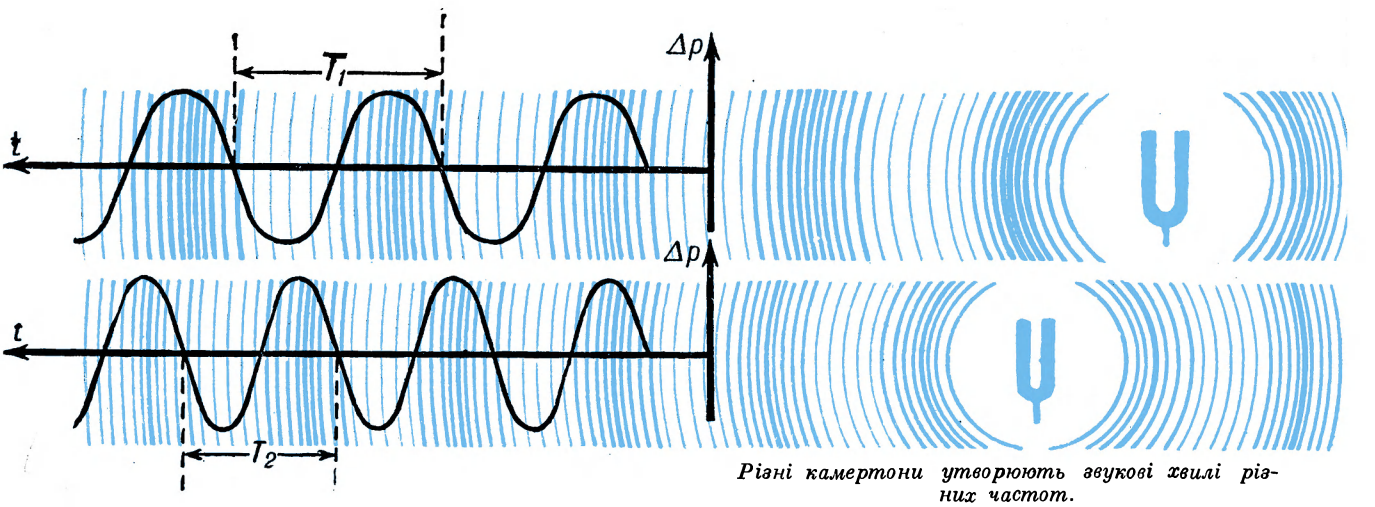


Зважуючи дві однакові посудини після того, як з однієї повітря було видалене, Галілео Галілей виявив, що повітря має вагу.

не притягання Землі, то намагання повітря зайняти щонайбільший об'єм розсіяло б атмосферу. Падінню молекул газів на Землю перешкоджає їх взаємодія. Дія сили ваги виявляється в тому, що нижні шари атмосфери щільніші від верхніх. У своєму хаотичному русі молекули стикаються одна з одною. Між двома зіткненнями молекула проходить зовсім маленьку відстань. Після кожного зіткнення змінюється швидкість і напрям руху. Молекули ніби тупцюють на одному місці. При зближенні молекул на дуже малі відстані між ними виникають сили відштовхування, а розлетівшись в різні сторони, вони знову притягаються одна до одної. Це відбувається тому, що на малих відстанях між молекулами переважають сили відштовхування, а на великих — сили притягання. Завдяки силам притягання й відштовхування, що діють між молекулами повітря, молекули весь час рухаються, а все повітря в цілому має пружність.

Вага повітряної оболонки Землі створює атмосферний тиск, і завдяки пружності тиск цей передається у всі сторони.

Тепер розглянемо, що відбувається, коли тіло, що є в повітрі, коливається. Коли тіло відхиляється з положення рівноваги, воно з одного боку стискує прилеглий до нього шар повітря, а з другого — розріджує. Коли стискається повітря, як виявив Бойль, його пружність збільшується, а отже, збільшується й тиск.



Різні камертони утворюють звукові хвилі різних частот.

Таким чином, при русі тіла, яке коливається, тиск повітря стає ледве-ледве більшим атмосферного з того боку, в який тіло рухається, і настільки ж меншим з протилежного боку.

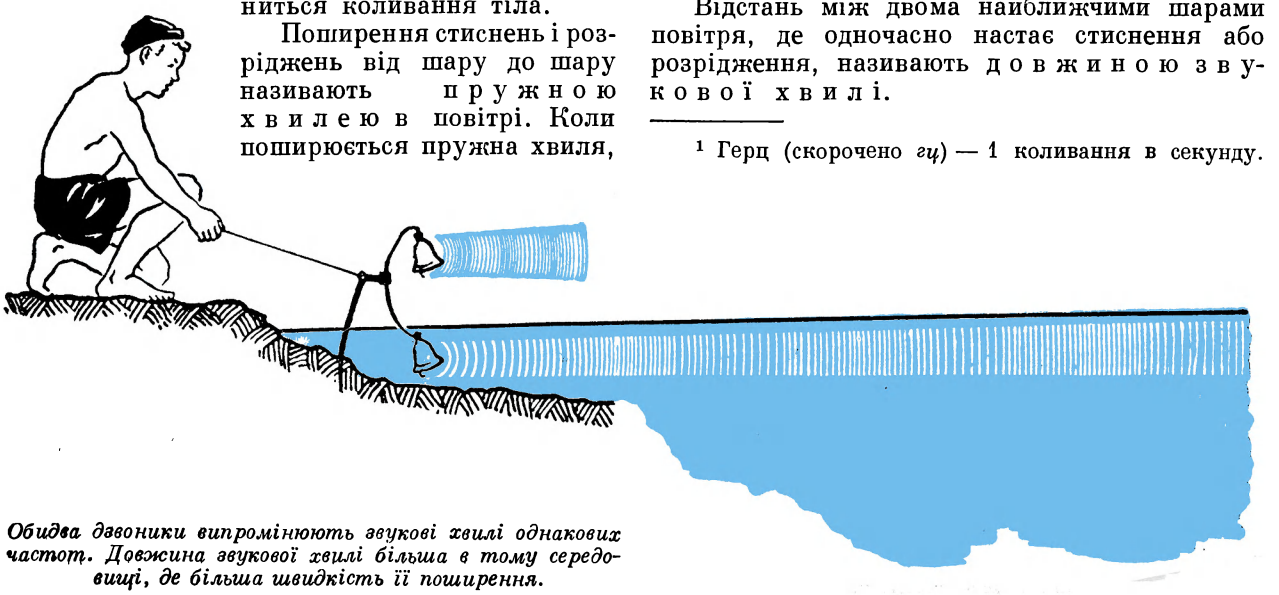
Досягнувши найбільшого відхилення, тіло повертається до положення рівноваги і, пройшовши його, створює тепер стиснення в тому місці, де раніше було розрідження, і розрідження там, де було стиснення. Таким чином, стиснення повітря замінюються розрідженнями через проміжок часу, який дорівнює періоду коливань. Стиснення і розрідження, які чергуються, завдяки пружності повітря передаються від шару до шару, поширюючись у всі боки. І так відбувається до того часу, поки не припиниться коливання тіла.

Поширення стиснень і розріджень від шару до шару називають пружною хвилею в повітрі. Коли поширюється пружна хвиля, то в кожній точці атмосфери, якої вона досягає, відбуваються періодичні зміни величини атмосферного тиску. Тиск, надлишковий над атмосферним, називають акустичним. Частота коливань величини атмосферного тиску залежить від частоти коливань тіла, яке породжує пружну хвилю. Різні тіла можуть коливатися з різними частотами, породжуючи в повітрі пружні хвилі різних частот.

Сприймання змін акустичного тиску нашим вухом відбувається тільки тоді, коли частота цих змін досягає 16—20 *гц*[1] і не перевищує 16—20 тис. *гц*. Пружні хвилі, частота яких перебуває в цих межах, називають звуковими хвилями, або просто звуком.

Відстань між двома найближчими шарами повітря, де одночасно настає стиснення або розрідження, називають довжиною звукової хвилі.

[1] Герц (скорочено *гц*) — 1 коливання в секунду.



Обидва дзвоники випромінюють звукові хвилі однакових частот. Довжина звукової хвилі більша в тому середовищі, де більша швидкість її поширення.

Звук може поширюватися не тільки в повітрі, але й в інших середовищах. Довжина звукової хвилі залежить від швидкості поширення звуку в цьому середовищі, а швидкість звуку визначається фізичними властивостями середовища: густиною і пружністю.

В повітрі при температурі 0° С і нормальному тиску звук поширюється з швидкістю 332 *м/сек*, в морській воді — з швидкістю близько 1500 *м/сек*, а в твердих тілах швидкості поширення досягають 5000 *м/сек*. До таких тіл належать сталь і алюміній.

ЕНЕРГІЯ ЗВУКОВОЇ ХВИЛІ І СИЛА ЗВУКУ

Молекули повітря весь час перебувають в тепловому русі. Якщо в повітрі поширюється звукова хвиля, то кожен шар, перпендикулярний до напряму поширення цієї хвилі, зазнає поперемінного стиснення й розрідження. Частинки повітря, крім теплового руху, набувають додаткового коливального руху. Цей рух відбувається в напрямі поширення звукової хвилі, тому звукову хвилю називають п о з д о в ж н ь о ю. Звукові хвилі несуть з собою енергію, яку надає їм джерело звуку.

Щоб з'ясувати процес поширення енергії, що рухається з швидкістю звукової хвилі, треба звернути увагу на особливість коливання багатьох частинок, між якими існують сили взаємодії.

Однак раніш звернемося до найпростішого випадку: розглянемо коливання математичного маятника. В крайніх положеннях швидкість руху маятника дорівнює нулю; найбільшого значення вона досягає в той момент, коли маятник проходить положення рівноваги. Це означає, що в крайніх положеннях кінетична енергія перетворюється в нуль, а в положенні рівноваги вона досягає найбільшого значення.

Кінетична енергія маятника витрачається на змінювання його положення відносно поверхні Землі, тобто на збільшення потенціальної енергії. Загальний запас енергії лишається незмінним, якщо, звичайно, усунуте тертя.

Коли відбувається коливання пружного середовища, наприклад повітря, де багато частинок, спостерігаємо іншу картину.

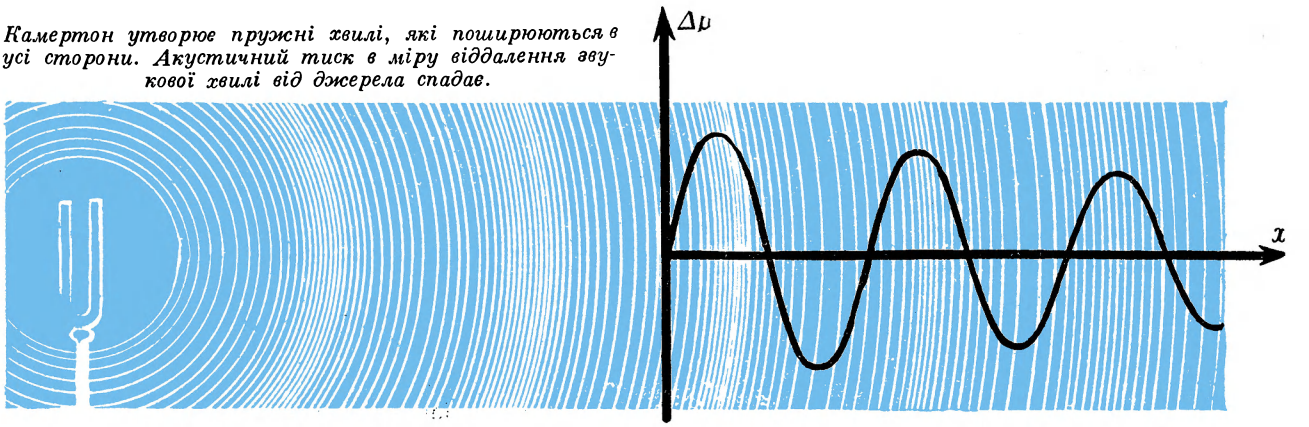
В шарі, де відбувається стиснення повітря (внаслідок чого збільшується тиск), зростає не тільки кінетична енергія частинок повітря, про що свідчить підвищення температури, але й їх потенціальна енергія.

Чи не значить це, що в даному разі порушується закон збереження енергії?

Ні! Такого явища природа не знає. Просто в той момент часу, коли в одному шарі повітря кінетична і потенціальна енергія частинок зростає, в ближчому шарі обидва види енергії відповідно зменшуються.

Таким чином, енергія, яку надає частинкам випромінювач, передається від шару до шару в напрямі поширення хвилі. Цей процес перетікання енергії від джерела в навколишнє середовище триває протягом всього часу коливання тіла.

Російський учений М. О. Умов обчислив величину кінетичної енергії, що протікає за одну секунду через один квадратний сантиметр поверхні, перпендикулярної до напряму поширення хвилі. Цю величину називають п о т о к о м е н е р г і ї. Величина потоку енергії є мірою інтенсивності звуку, або, як кажуть, мірою с и л и з в у к у. Вимірюється вона у ватах на *кв. см* (*вт/см*^{2}).



Камертон утворює пружні хвилі, які поширюються в усі сторони. Акустичний тиск в міру віддалення звукової хвилі від джерела спадає.

Сила звуку пропорціональна квадрату звукового тиску, тобто квадрату величини тиску, надлишкового над атмосферним, який утворюється внаслідок стиснення шару.

Потік енергії звукової хвилі людського голосу дуже малий. Уявімо собі, що одночасно говорить сто тисяч чоловік. Енергія звукових хвиль їх голосів, якщо перетворити її в електричну, настільки мала, що нею з трудом можна було б запалити лампочку кишенькового електричного ліхтарика. Потужність одночасної розмови всіх людей на земній кулі ледве чи більша від потужності автомобіля «Москвич».

Ми знаємо, що звук поширюється в усі боки, тому величина потоку енергії в міру віддалення від джерела проходить через поверхню кулі дедалі більшого радіуса. Енергія, яка протікає через одиницю поверхні, зменшується обернено пропорціонально квадрату відстані даної точки від джерела.

Таким чином, із збільшенням відстані від джерела звуку величина потоку енергії стає дедалі меншою, а звук — дедалі слабкішим. Ця обставина примусила людину створити пристрої, які дають змогу скеровувати потік звукової енергії в одному певному напрямі.

Якщо, наприклад, ми хочемо когось покликати на великій від нас відстані, ми звичайно підносимо до рота долоні, напрямлюючи тим самим увесь потік звукової енергії в потрібний для нас бік.

За цим же принципом побудований рупор. Рупор створює спрямовану звукову хвилю, потік енергії якої не розсіюється в навколишньому просторі, а концентрується в одному пучку. Крім того, рупор збільшує звучащу поверхню, а чим вона більша, тим більше енергії віддає навколишньому середовищу звучаще тіло. Ця властивість використовується і в музичних інструментах (дека рояля, корпус скрипки, розтруби духових інструментів).

Рупор, як описують історики походів грецького полководця Олександра Македонського, допомагав йому командувати військами під час боїв. В гуркоті бою було важко розібрати слова команди, але якщо давати її через рупор, вона стає добре чутною на великих відстанях.

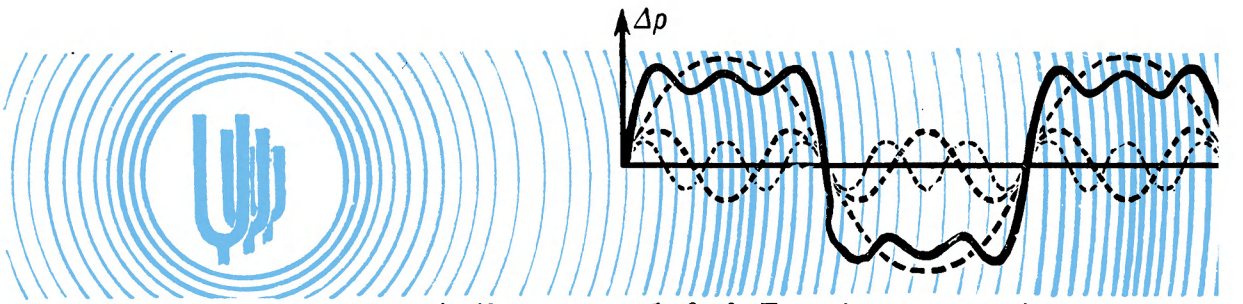
В наш час у радіомовленні форма рупорів для гучномовців вибирається з таким розрахунком, щоб звук потрібної сили поширювався в заздалегідь вибраному напрямі.

ТОН, ВИСОТА, ТЕМБР І ГУЧНІСТЬ ЗВУКУ

Поняття т о н у, як характеристики звуку, запровадив у вчення про звук Галілео Галілей. Висота тону визначається частотою коливань звучащого тіла. Якщо частота коливань мала, то звук буде низького тону; якщо частота коливань велика, то звук буде високого тону.

Якби звучащі тіла створювали коливання тільки однієї частоти, то ми не могли б розрізняти музичні інструменти, голоси людей. Але всяке звучаще тіло створює цілу суміш тонів, що відрізняються висотою й силою. Найнижчий з них називають о с н о в н и м т о н о м. Більш високі тони, що супроводжують основний тон, називають о б е р т о н а м и.

Різна кількість обертонів, подібно до світлових відтінків основного кольору, «забарв-



Частоти звукових хвиль трьох камертонів відносяться, як 1 : 2 : 3. При спільному звучанні вони створюють складне коливання величини акустичного тиску.

лює» звук. Звучання основного тону разом з обертонами створює звукове сприйняття, що його називають тембром звуку. Кожному музичному інструменту й голосу властивий свій тембр. Відмінність одного тембру від іншого зумовлена різною кількістю і силою обертонів, які супроводжують звучання основного тону. Чим більше обертонів у звучанні основного тону, тим приємніший тембр звуку.

Голоси деяких людей, як кажуть, мають «металічний» відтінок, а в інших — «м'який, бархатистий». Така різниця в голосах обумовлена кількістю і силою обертонів. Якщо високі тони переважають над низькими, то кажуть, що в голосі чується «звучання металу». Якщо ж переважають низькі тони, то голос більш м'який. При цьому не можна випускати з уваги, що сприймання голосу на слух залежить не тільки від кількості і сили звуку обертонів, що супроводжують основний тон, але й від чутливості вуха до тонів різної висоти.

Характеристикою сприйманого вухом звуку є гучність. Складність цього поняття в тому, що гучність зв'язана з чутливістю вуха й психічним сприйманням.

Коливання однієї і тієї самої частоти, поширюючись у повітрі, може утворювати різний надлишковий над атмосферним тиск. Якщо створений надлишковий тиск незначний, то звук слабкий, ледве чутний. При значному надлишковому тиску звук гучний. Яких же значень може досягати величина звукового тиску? Широкій границі звукового тиску, сприйманого вухом, доводиться дивуватися. Вухо здатне сприймати таку малу зміну тиску, як, наприклад, сота частина мільйонної частки грама на квадратний сантиметр, і зміну тиску, в 100 мільйонів раз більшу.

Порогом чутності називають найнезначнішу зміну тиску, сприйману вухом.

Щодо сприйняття на порозі чутності, то для малих частот тиск повинен бути вищий, ніж для великих, щоб звуки були однакової гучності. Тому що звуковий тиск низького тону завжди більший, ніж тиск високих тонів, що входять у звучання, то тембр звуку визначається не тільки кількістю високих і низьких тонів, але й співвідношенням звукових тисків між ними.

Завдяки цій обставині вухо відрізняє один тембр від іншого, бо воно здатне зразу розібратися у всій сукупності тонів складного звуку. Це називається здатністю вуха аналізувати звук.

СПРИЙМАННЯ ЗВУКУ ОРГАНОМ СЛУХУ

Як побудований слуховий орган — вухо? Вушна раковина з початком слухового проходу називається зовнішнім вухом.

Слуховий прохід закінчується барабанною перетинкою. За нею — ділянка середнього вуха, яке складається з порожнини, заповненої повітрям, і трьох слухових кісточок. Перша з них, молоточок, одним кінцем зчленована з барабанною перетинкою, другим — з ковадлом. Ковадло з'єднане з третьою кісточкою — стременем. Стремено впирається в перетинку, що відокремлює середнє вухо від внутрішнього. Молоточок, ковадло й стремено — це важільний механізм, який передає коливання барабанної перетинки у внутрішнє вухо.

Внутрішнє вухо являє собою згорнутий завиткою і наповнений рідиною лабіринт.

Під час тиші тиск повітря з обох боків барабанної перетинки однаковий, і вона перебуває в стані спокою.

При збільшенні тиску повітря в зовнішньому вусі барабанна перетинка прогинається всередину. При цьому повітря, що є в середньому вусі, стискається. Коли тиск повітря в зовнішньому вусі зменшується, барабанна перетинка, завдяки пружності повітря в середньому вусі, прогинається в протилежний бік.

Періодична зміна величини акустичного тиску приводить до періодичних рухів барабанної перетинки. Коливання барабанної перетинки приводить в рух молоточок, ковадло й стремено. Стремено примушує перетинку, що розділяє середнє й внутрішнє вухо, здійснювати коливання. В рідині, яка заповнює лабіринт, виникають пружні хвилі, які приводять в рух розташовану в завитці мембрану.

Мембрана стикається з кінчиками корінців слухових нервів, які передають подразнення в мозок. Це подразнення і сприймається мозком як звук.

ЯК ПОЯСНИТИ НАШУ ЗДАТНІСТЬ ВИЗНАЧАТИ, ЗВІДКИ ПРИХОДИТЬ ЗВУК

Уявіть собі, що вас хтось гукнув. Почувши голос, ви повертаєте голову саме в тому напрямі, звідки він доніссся. Чому? Виявляється, слухові подразнення від кожного вуха приходять в мозок одночасно тільки в тому випадку, якщо джерело звуку перебуває від них на однаковій відстані. Голову ми завжди повертаємо в той бік, звідки звукове подразнення прийшло в мозок першим.

Таким чином, сприймання звуку обома вухами дає можливість визначати положення джерела звуку. Ця властивість нашого слуху називається бінауральним ефектом. Його використовують для створення стереофонічного звучання в кіно.

При демонструванні стереофонічно озвучених фільмів звуки відтворюються динаміками, розташованими в різних точках кінозалу.

МУЗИЧНІ ТОНИ І ШУМИ

Усі звуки можна поділити на два види: музичні тони і шуми.

Звук називають музичним, якщо зміна акустичного тиску, яку сприймає вухо, повторюється регулярно, через рівні проміжки часу.

Звук перестає бути музичним і його називають шумом, коли зміна акустичного тиску відбувається безладно.

Особливий інтерес являють собою співзвуччя — одночасне звучання кількох тонів. Розрізняють два види співзвуччя: консонанс і дисонанс.

Щоб зрозуміти суть цих явищ, треба насамперед і спинитися на найпростішому співзвуччі — одночасному звучанні двох тонів. Кожен з них має свою частоту коливань. Відношення частот коливань двох тонів називають інтервалом. Якщо відношення частот дорівнює 1 : 1, інтервал називають унісоном. При відношенні частот, яке дорівнює 1 : 2, інтервал називають октавою; якщо ж воно дорівнює 2 : 3 — квінтою, а при відношенні частот 3—4 — квартою. Нарешті, відношення частот 4 : 5 називають великою терцією і 5 : 6 — малою терцією.

Якщо два тони дуже мало відрізняються один від одного за частотою, то їх спільне звучання створює своєрідне завивання — биття. Це явище полягає в періодичному підсиленні й послабленні спільного звучання.

Кількість підсилень чутного звуку за одну секунду називають частотою биття. При малій частоті биття (не більше чотирьох підсилень за секунду) вони не шкідливі для слухового сприйняття.

Якщо частота биття досягає трьох десятків на секунду і особливо тридцяти трьох, звукове відчуття нестерпне. Однак при більшій частоті (близько 130 підсилень на секунду) вплив биття на звукове відчуття зникає.

З'ясувати це явище дуже важливо для розуміння побудови музичних співзвуч. Справа в тому, що при звучанні струн, крім основного тону, завжди є верхні тони (їх називають обертонами). Розглянемо для прикладу дві струни, основні частоти яких — 200 *гц* і 400 *гц*. Відношення частот у цьому випадку дорівнює 1 : 2, тобто інтервал становить октаву.

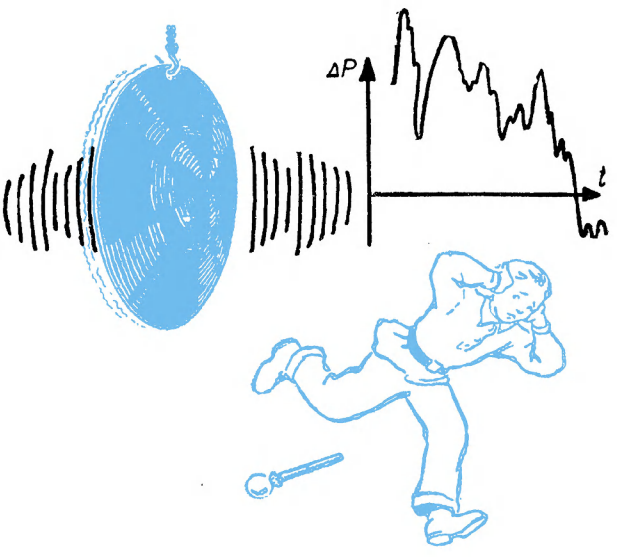
Припустимо, що кожна з них має шість тонів. Тоді перша струна звучатиме так:

200 *гц* — основний тон,
400 *гц* — перший обертон,
600 *гц* — другий обертон,
800 *гц* — третій обертон,
1000 *гц* — четвертий обертон,
1200 *гц* — п'ятий обертон.

Звучання другої струни має такі тони при відповідному діленні:

400 *гц* — основний тон,
800 *гц* — перший обертон,
1200 *гц* — другий обертон,
1600 *гц* — третій обертон,
2000 *гц* — четвертий обертон,
2400 *гц* — п'ятий обертон.

При спільному звучанні обох струн вони мають три загальні прості тони: 400, 800 і 1200 *гц*. Чим більше однакових простих тонів у спільному звучанні струн, тим більший ступінь спорідненості співзвуч. Биття в такому випадку не спостерігається.



Такі співзвуччя називають консонансом.

Інша картина, якщо октава розстроєна. Нехай, наприклад, основний тон другої струни не 400 *гц*, а 410; тоді її обертони будуть: 820, 1230, 1640, 2050 і 2460 *гц*. Близькі тони: 400 і 410, 800 і 820, 1200 і 1230 *гц* — будуть давати биття, частота яких 10, 20 і 30 *гц*. Співзвуччя подібного роду будуть створювати завивання. Маємо дисонанс.

Таке пояснення консонансу й дисонансу дав фізик і фізіолог Гельмгольц.

Вивчення інтервалів тонів, які дають кращі консонанси, привело до утворення звукової гами, де відношення частот точно визначене.

Мажорна, або діатонічна, гама включає тони, частоти яких відносяться, як

$$1 : \frac{9}{8} : \frac{5}{4} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{5}{3} : \frac{15}{8}.$$

Звук, частота якого дорівнює 65 *гц*, називають «до» першої октави. В різних країнах це число небагато відрізняється від 65. Якщо ми, наприклад, будемо вважати частоту «до» першої октави рівною 64 *гц*, то «до» другої октави буде звук, частота якого становить 128 *гц*, а третьої октави — 256 *гц*.

Приймемо «до» третьої октави за основний тон і, згідно з діатонічною гамою, знайдемо останні шість тонів. Числа їх коливань будуть дорівнювати: «ре» — 288 *гц*; «мі» — 320 *гц*; «фа» — 341,33 *гц*; «соль» — 384 *гц*; «ля» — 426,66 *гц*; «сі» — 480 *гц*.

Зазначені частоти коливань відповідають довільно взятій частоті коливань «до» першої октави.

Уточнивши значення «до» першої октави, слід відповідно перелічити й інші тони.

До недавнього часу тон «ля» третьої октави прийнято було вважати рівним 435 *гц*. Цьому значенню «ля» третьої октави відповідає «до» першої октави — 65,25 *гц*.

Тепер прийнято вважати «ля» третьої октави звуком частоти 440 *гц*. Його можна систематично слухати по радіо, коли подають сигнали настройки музичних інструментів.

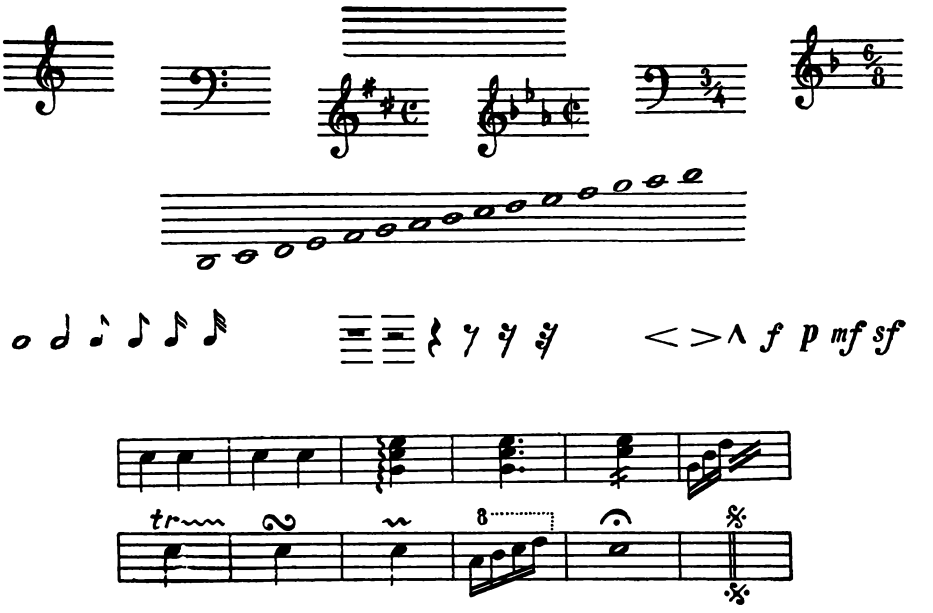
Різниця в частотах, вибраних для «до» першої октави, не є особливо важливою, бо для музичних цілей важливе не абсолютне значення частоти, а відношення частот, тобто величина інтервалу.

ЗАПИС ЗВУКІВ

Звуки мелодій за давніх часів записували буквами, в середні віки — особливими значками — невмами, які приблизно вказували на підвищення й пониження мелодії.

У X ст. для уточнення висоти звуку невми почали писати на лінійках, які точно визначали висоту звуку, тобто тон. Поступове вдосконалення привело до сучасного запису звуків. Цим ми зобов'язані Гвідо Аретинському, який винайшов систему ліній, а тонам дав назви.

Потім стали записувати звуки за допомогою особливих значків — нот — на п'яти лінійках, які назвали нотоносцями. Крім п'яти основних лінійок, існують додаткові — п'ять зверху і п'ять внизу. Що означають ноти на лінійках, вказує ключ, який ставлять на початку п'яти лінійок. Для фортепіанної музики характерні два ключі — скрипичний і басовий. Для запису хорової й оркестрової музики існують і інші ключі: «до», «соль», «фа».

Основні лінійки розподілено на рівні частини, так звані такти. Такт визначає тривалість звучання. Розмірність музичного твору

вказується спочатку, слідом за ключем, і там же вказується тональність. Значки — ноти — пишуть як на лінійках, так і між ними.

На рисунку (стор. 265) наведена таблиця всіх цих знаків.

Люди широко користуються нотами. Але, крім нот, вони придумали й інші чудові способи запису звуків.

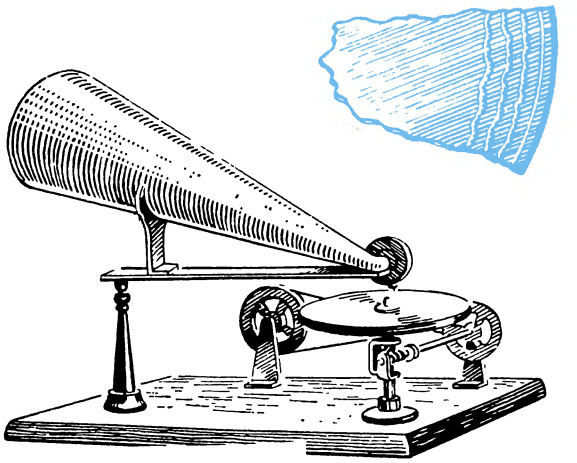
У Москві, в музеї Льва Миколайовича Толстого, є невеликий прилад, який прибув сюди з Америки. Його надіслав у подарунок Толстому Томас Едісон. Це фонограф, або, як називали його тоді, «говоряще письмо».

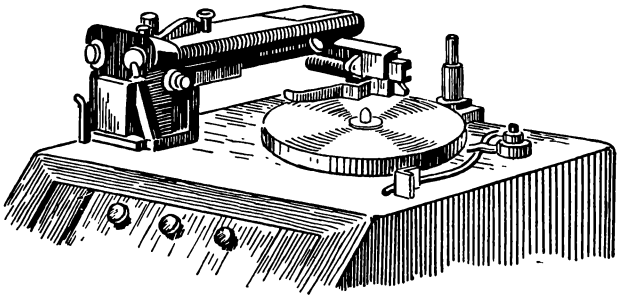
Як побудовано цей прилад?

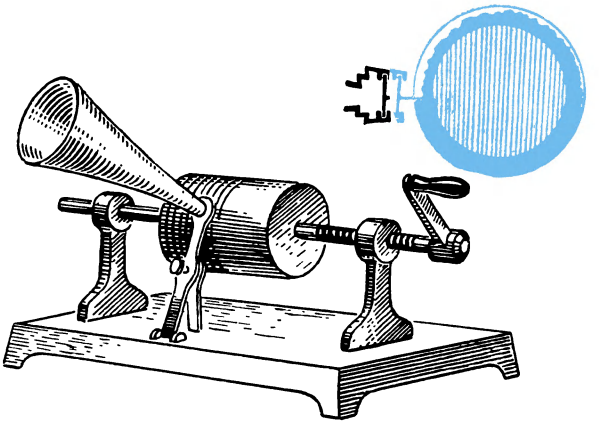
Звук дають тіла, що коливаються в якомусь середовищі, наприклад у повітрі. Якщо на шляху поширення звуку помістити тонку пластинку, то вона під дією коливання навколишнього середовища почне рухатися.

Едісон укріпив на такій пластинці голку з сапфіра, яка ледве торкалася до спеціального циліндра, вкритого листом олова. При обертанні циліндра голка злегка дряпала його поверхню. Для того щоб після одного оберту голка не попадала в пророблену нею борозну, циліндр при обертанні зміщався по осі. Тому борозна на поверхні циліндра навивалась спіраллю. Коли на пластинку падала звукова хвиля, то від дії звуку вона починала коливатися й притискувала голку до поверхні циліндра з різною силою. Глибина дряпини при цьому весь час змінювалася.

Таким чином Едісону удалось записати мову у вигляді дряпин на поверхні циліндра. Для її відтворення досить було помістити голку на початку борозни. Під час обертання циліндра вона ковзала вздовж борозни, весь час підстрибуючи і примушуючи пластинку робити коливання. Пластинка ж, коливаючись, відтворювала записану раніше мову. При дальшому вдосконаленні приладу олов'яну поверхню циліндра замінили воском, що значно здешевило прилад. Через деякий час обертовий циліндр був замінений плоскою пластинкою, на якій борозна наносилась по згортувальній спіралі.







Такий прилад надіслав у подарунок Леву Миколайовичу Толстому Томас Едісон.

На виготовленій таким способом восковій пластинці різцем робився запис. Коливання різця відбувалися не по глибині борозни, а по її ширині. Цей прилад назвали грамофоном.

Грамофон мав величезну перевагу перед фонографом Едісона: стало можливим копіювати записи звуків.

Тепер звук записують на дисках, виготовлених із м'якого матеріалу. Потім пластинка копіюється на метал, і роблять її відбитки. Таким чином, можна дістати багато екземплярів одного й того самого звукового запису.

Записувати звук можна й за допомогою світла. З цією метою використано кілька різних за своєю природою явищ.

Насамперед звернемося до фотографії.

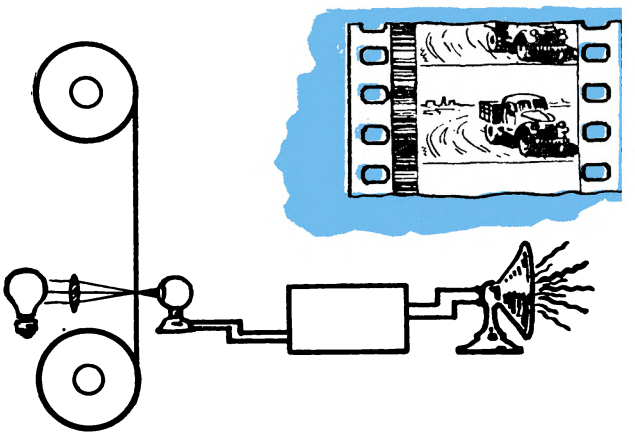
Розглядаючи негатив, легко помітити, що між темними й світлими місцями різких границь немає. Плавний перехід від світла до тіні свідчить про здатність світлочутливої плівки відрізняти слабке й сильне світло. На цю обставину й звернули увагу фізики, коли вирішили записати звук за допомогою світла.

Щоб здійснити такий запис, необхідно було звукові коливання перетворити в коливання електричного струму, який живить електричну лампочку. З цією метою мікрофон включили в коло лампочки. Потім мигаючим світлом цієї лампи стали освітлювати рухому фотографічну плівку. Після обробки на ній виявилася світла смуга різної прозорості. Де світла попало більше, смуга була темніша, де менше — світліша. Утворився негатив.

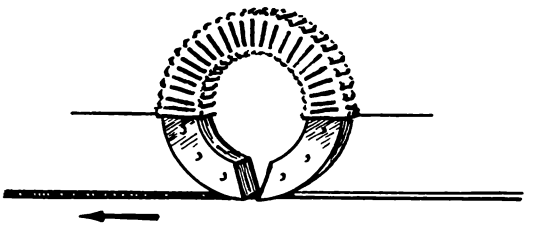
Відпечатавши негатив, дістали плівку з оберненим зображенням світла й тіні. Це й була фотографія звуку. Щоб примусити фотографію звучати, стали пропускати через рухому плівку вузький пучок світла від лампочки сталої яскравості. Тому що смужка на плівці була різної прозорості, то світловий потік, що проходив крізь неї, світив то яскравіше, то тьмяніше. Тепер треба було мигаюче світло перетворити в звук.

Щоб розв'язати це завдання, скористалися фотоелектричним ефектом.

Явище фотоефекту можна спостерігати за допомогою електроскопа, в якому кулька замінена пластинкою. Якщо зарядити пластинку електроскопа негативно і потім освітити її, то листочки електроскопа поступово опадуть. Під дією світла негативно заряджена пластинка розряджається.



За допомогою фотоелемента можна примусити звучати фотографічний знімок звуку.



Стрічка, покрита магніточутливою речовиною, намагнічується електромагнітом, по обмотці якого проходить струм звукової частоти.

На основі цього явища створено прилад, який назвали фотоелементом. Найпростіший фотоелемент являє собою скляну посудину, всередині якої вміщено дві пластинки. Одна з них з'єднується з негативним полюсом електричної батареї і тому заряджається негативно, друга — з позитивним полюсом.

Під дією світла з негативно зарядженої пластинки вириваються електрони, які зараз же притягаються другою, позитивно зарядженою пластинкою. Таким чином, дістаємо спрямоване переміщення негативних електричних зарядів від однієї пластинки до другої — по колу проходить електричний струм. Наявність струму легко встановити, якщо в коло включити електровимірювальний прилад — гальванометр. Спостерігаючи за стрілкою гальванометра, можна переконатися, що величина струму в колі змінюється залежно від зміни інтенсивності світла, яке падає на негативно заряджену пластинку.

За допомогою фотоелемента можна примусити звучати фотографічний знімок звуку. З цією метою вузьким пучком світла просвічують звукову доріжку рухомої фотоплівки. Світло, яке пройшло крізь неї, матиме змінну інтенсивність. Створюваний ним фотострум залежатиме від зміни інтенсивності світла. Після підсилення фотоелектричний струм проходить обмоткою електромагніту, який, притягаючи з різною силою мембрану, примушує її коливатися, звучати.

Так відтворюється звук, записаний на фотоплівку.

Запис звуку за допомогою світла широко застосовується в кіно. Звук записують на кінострічці поруч із зображенням. Існує кілька способів запису звуку в кіно, але всі вони грунтуються на явищі фотоелектричного ефекту.

(Докладніше про це див. статтю «Ожила фотографія» в т. 5 ДЕ).

Порівняно недавно вдалось дістати магнітний запис звуку. З цією метою було використане явище електромагнітної індукції.

Якщо на тонкій алюмінієвій мембрані укріпити легку дротяну котушку, що знаходиться між полюсами постійного магніту, то рух котушки в магнітному полі відбуватиметься з частотою коливань мембрани. При цьому в котушці виникатиме індукційний струм, який змінюється відповідно до частоти звуку.

Якщо тепер цей струм подати в обмотку електромагніту, перед яким можна протягувати стрічку, вкриту спеціальною магніточутливою речовиною, то вона буде намагнічуватися. Намагніченість стрічки збільшуватиметься при підсиленні струму і зменшуватиметься при його послабленні. Таким чином, на стрічці дістанемо магнітний запис звуку.

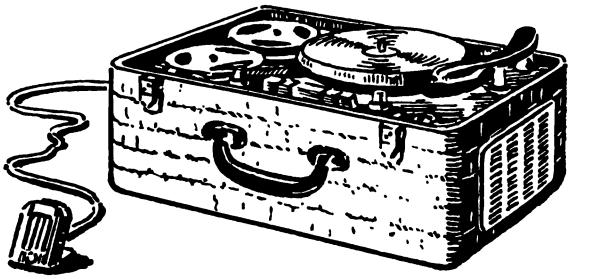
Щоб відтворити такий запис, треба стрічку з попередньою швидкістю протягнути поблизу електромагніту. Відбудеться обернений процес. В обмотці виникатиме струм різної величини. Потім, після підсилення, струм пропустять через обмотку другого електромагніту, який примушує коливатися мембрану, що знаходиться поряд з ним.

Коливання мембрани створять звукові коливання повітря, і звук буде відтворено.

Легко помітити перевагу магнітного запису звуку порівняно з світловим записом. Тут не потрібна будь-яка додаткова обробка стрічки (плівки), на якій записано звук. Коли запис звуку зроблено за допомогою світла, фотоплівку треба спочатку проявити й відпечатати. Тільки після цього можливе відтворення звуку. Звук, записаний на магнітну плівку, може бути зразу відтворений і на випадок потреби «стертий».

«Стирається» записаний звук дуже просто. Для цього досить магнітну плівку з записом протягнути біля електромагніту, по обмотці якого проходить швидкозмінний струм. Плівка при цьому багато разів перемагнічується, і завдяки цьому зникають сліди записаного на ній звуку.

Після такого «стирання звуку» магнітна плівка придатна для нового запису, чого не можна зробити з фотографією звуку на фотоплівці. Після технічного удосконалення магнітного методу запису звуку був створений зручний прилад — магнітофон. Магнітофон записує й відтворює звук. Магнітофонна плівка виготовляється з пластмаси. Поверхня плівки



Магнітофон з пристроєм для програвання пластинок.

вкрита дрібнозернистим феромагнітним порошком.

Магнітний запис широко застосовується в радіопередачах. Багато з того, що треба передати по радіо, зручніше спочатку записати на плівку, щоб в потрібний час відтворити.

ПЕРЕДАЧА ЗВУКУ НА ВІДСТАНЬ

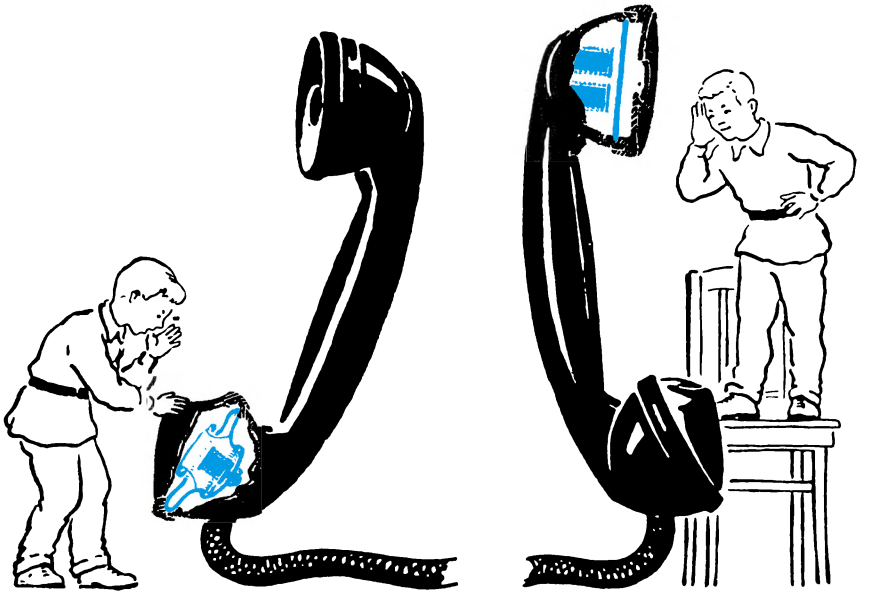
Телефон винайшов американський фізик Белл. В основу свого винаходу він поклав уже відоме нам явище електромагнітної індукції. Намотавши котушку ізольованого дроту на залізне осердя й піднісши до нього камертон, Белл виявив, що в замкненій котушці виникає змінний струм.

Це відбувається тому, що, коливаючись, ніжка камертона викликає зміну магнітного поля осердя. Потім Белл з'єднав кінці обмотки першої котушки з кінцями обмотки другої такої самої котушки і помістив біля її сердечника другий камертон. Перший камертон викликав у першій котушці струм, який, проходячи по обмотці другої котушки, намагнічував її сердечник. Завдяки цьому в такт змінам струму сердечник приводив у рух ніжку другого камертона, що була поблизу, тобто примушував камертон звучати. Але це були звуки одноманітні, схожі на дзижчання.

Як же передати мову? На допомогу Беллу прийшли досліди німецького фізика Хладні, який вивчав коливання пластин. Для того щоб зробити видимим рух різних ділянок пластини, він насипав на її поверхню пісок. Ударяючи смичком по краю закріпленої в одній точці пластини і торкаючись пальцем до інших її точок, Хладні спостерігав, як розташовуються піщинки. Вони збиралися химерними узорами. Але одному й тому самому тону звучання пластини відповідав один і той самий узор піску на її поверхні. Повторюючи досліди Хладні,

Белл помітив, що пластини відгукуються і на звук людського голосу.

Вибравши пластинки відповідної товщини, він помістив їх замість камертонів перед електромагнітами. Тепер коливання пластинки від дії звуку людського голосу перетворювалось в імпульси електричного струму і знов відтворювалось другою пластинкою. Беллу, таким чином, удалось розв'язати принципіальне завдання передачі звуку на відстань.



Винайдений Беллом прилад був названий телефоном. Конструкція телефону в той час мала великі технічні недоліки. Спочатку дві особи, з'єднані телефоном, могли говорити тільки по черзі, використовуючи для цього один і той самий прилад — телефон Белла.

Усунув цю незручність мікрофон винахідника Юза. Мікрофон Юза являв собою дві вугільні чашечки, всередині яких був поміщений стержник з вугілля. Розмір стержника був такий, що він легко міг дрижати від найменшого стрясіння. Якщо з'єднати чашечки з полюсами батареї, величина струму в колі внаслідок дрижання стержника змінювалась, бо при цьому змінювався опір кола (через порушення контакту). Коливання стержника викликались звуками людської мови. Ввімкнувши мікрофон в коло телефону Белла, можна викликати вібрації другої пластини безпосередньо змінюваним струмом. Так була створена телефонна трубка. З часом вугільний стержник мікрофона замінили вугільним порошком, опір якого дуже різко змінюється залежно від зміни акустичного тиску. Тепер існує кілька типів мікрофонів, де використовуються інші фізичні явища, які можна пристосувати для тих же цілей, тобто для вловлювання звуків

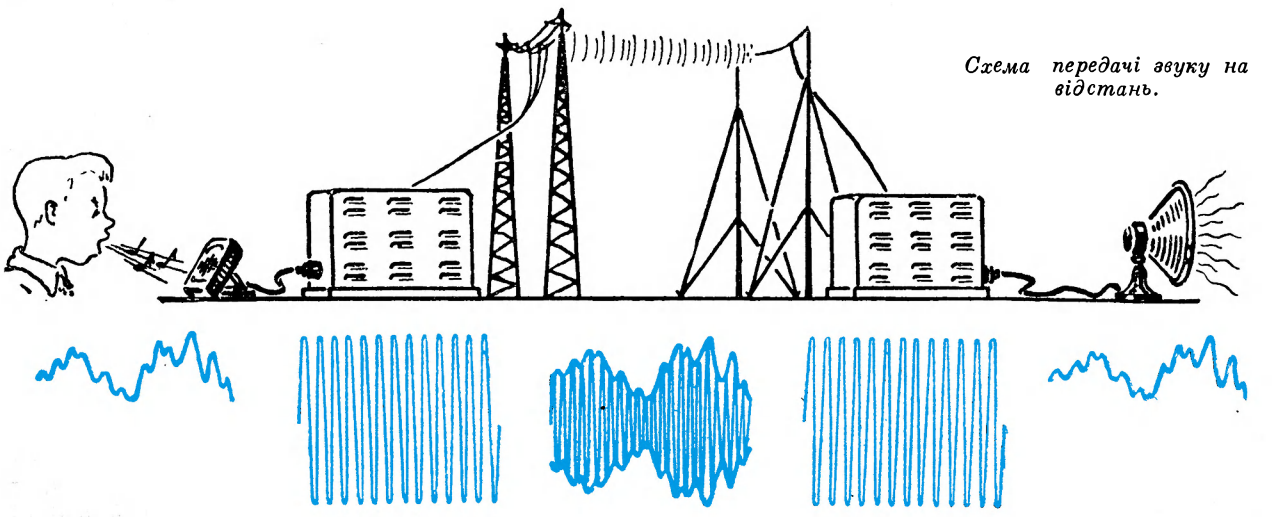


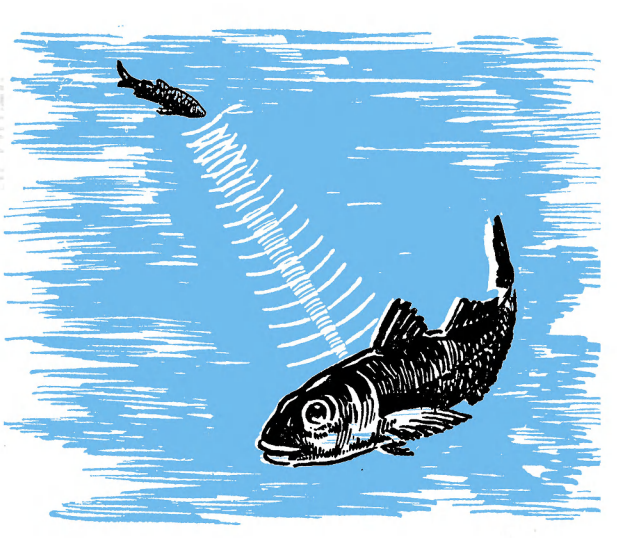
Схема передачі звуку на відстань.

і перетворення їх у коливання електричного струму.

Через чверть століття після винаходу телефону німецький фізик Герц дістав електромагнітні хвилі.

Російський фізик Олександр Степанович Попов використав електромагнітні хвилі для передачі звукових сигналів без проводів.

Можливість передавати мову й музику полягає в тому, що звукові коливання, перетворені в коливання електричного струму і з'єднані з електромагнітними коливаннями високої частоти, можна випромінювати в простір. У приймачі електромагнітні коливання високої частоти відокремлюють від електричних коливань звукової частоти. Останні надходять в репродуктор телефону, примушуючи пластинку робити відповідні коливання й тим самим випромінювати звук в навколишній простір. Така принципова сторона проблеми передачі звуку по радіо.



НЕЧУТНІ «ЗВУКИ»

Нечутні «звуки» — це пружні хвилі, частота коливань яких лежить або нижче 16 *гц*, або вище 16—20 тис. *гц*. Такі частоти не сприймаються вухом людини.

Якщо тіло коливається з частотою, меншою від 16 *гц*, воно випромінює інфразвук, а якщо з більшою від 20 тис. *гц* — ультразвук. Практично використовувати нечутні «звуки» люди навчились не так давно. А коли були створені високочутливі приймачі звуків найрізноманітніших частот, виявилось, що ці звуки поширені в природі так само широко, як і чутні. З'ясувалося, що їх випромінюють і сприймають живі істоти на суходолі, в повітрі й у воді. Тепер відомо, що собаки сприймають ультразвуки з частотою до 100 *кгц*. Цим користуються дресирувальники для подачі собакам команди, не чутної людьми.

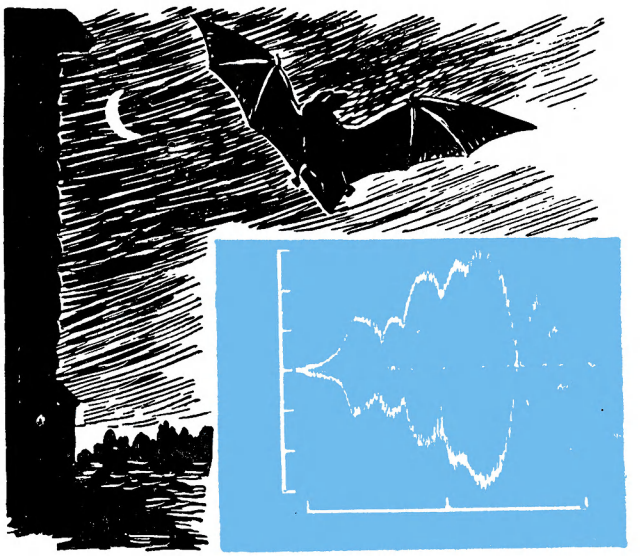
Установлені в морі приймачі ультразвуку виявляють ультразвук, коли з'являються «плаваючі острови» планктону. Виявляється, ультразвукові хвилі створюються крихітними веслоногими рачками, які входять до складу планктону, коли вони труть одну лапку об другу.

У морі були виявлені чутні звуки музичних тонів. Їх подають деякі риби. Виявилось, що жаба-риба, морський півень, риба-свинка, риба-квакун, горбиль-пляма й риба-кішка (назви риб подано в перекладі з латинської) мають талант співаків. Ці риби водяться в Атлантичному океані й здавна були відомі науці як звичайнісінькі німі істоти. Фізики спростували це уявлення. Тепер уже не можна користуватися висловом «німий, як риба», коли даєш клятву зберігати мовчання. Риби, виявляється, мають голос, та ще й музичний. І якщо морських співаків збереться багато, то, як знати, можливо, вони влаштують справжній концерт.

Подає звуки й саме море. Частота їх менша від 16 *гц*. Це так званий «голос моря».

Рвучкий вітер десь далеко зароджує шторм, рухає поверхню води. Стискування й розрідження морської хвилі передаються в простір над поверхнею моря і породжують інфразвукову хвилю. Інфразвуковий тиск відчувають різні мешканці моря: медузи, ракоподібні істоти, що живуть у вогкому морському піску, морські блохи й гаморуси. Почувши «голос моря», вони ховаються у водних глибинах або в прибережній траві. Ще раніше дізнаються про наближення шторму морські тварини, що знаходяться далеко від берега, тому що інфразвук у воді поширюється майже в п'ять раз швидше, ніж у повітрі, — з швидкістю 1500 *м/сек*.

Риби, які живуть на дуже великих морських глибинах, куди ледве проникає світло, користуються ультразвуком надто своєрідно. Вони випромінюють ультразвукові хвилі, а сприймають луну. Це замінює їм під час полювання зниклий зір.



Запис ультразвукового імпульсу кажана.

Ультразвук добре відбивається від повітряного пузиря риб. Сприйнявши луну, рибамисливець пливе в потрібному напрямі, не випускаючи «з уваги» свою здобич.

Влітку на селі, коли настають присмерки, можна спостерігати, як метушаться зигзагами кажани, шелестячи сухими вугластими крилами. Спостерігаючи стрімкий політ кажана, гадаєш, що ось-ось він налетить на стовбур дерева або стінку сарая. Але кожного разу, зустрічаючи на шляху перешкоду, кажан стрімко шугає вгору або круто повертає вбік, продовжуючи запаморочливу погоню за малюсінькими комарами. До глибокої ночі продовжується це невтомне, повне риску полювання.

Справді дивно, як удається кажанові з маленькими підсліпуватими очима помітити в пітьмі здобич і, не зменшуючи швидкості, обминути перешкоду.

Здається, що чудо врятовує його від вірної загибелі, так безглуздо наражає він себе весь час на небезпеку.

Ця обставина привернула увагу природознавців. Найретельніші дослідження переконливо довели, що зір у кажана дуже слабкий. Він майже сліпий. Але те, як він орієнтується в складній обстановці і як відшукує собі здобич, довгий час лишалося таємницею для людей.

ВИПРОМІНЮВАЧІ УЛЬТРАЗВУКУ

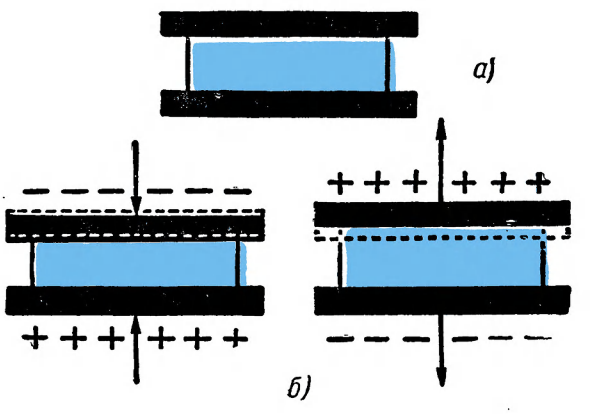
Частота коливань повітря, що її викликають сучасні випромінювачі ультразвуку, досягає не тільки десятків тисяч, але й сотень мільйонів герців. Винахідливий розум людини використав для цієї мети давно відкрите, але залишене спочатку без уваги явище.

У 1880 р. французькі вчені брати Пьєр і Жорж Кюрі, які досліджували властивості кристалів, помітили, що коли кристал кварцу стиснути з двох боків, то на його гранях, перпендикулярних до напряму стиснення, виникнуть електричні заряди: на одній грані позитивні, на протилежній — негативні.

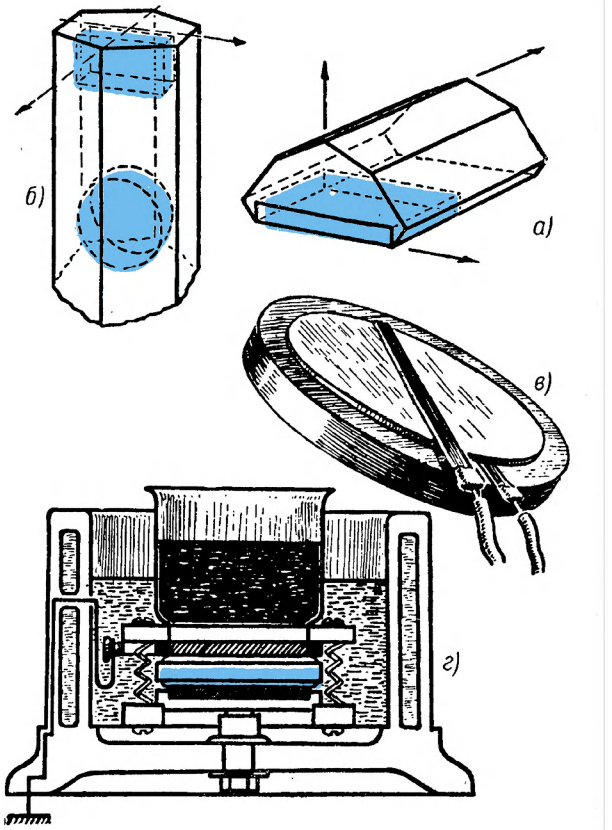
Було виявлено, що такі властивості мають також інші кристали — турмалін, сегнетова сіль, цинкова обманка, хлорат натрію й цукор. З'ясувалось також, що й при розтягуванні на гранях кристала виникають заряди, але вже знаків, протилежних до тих, які виникають при стисненні. Явище виникнення електричних зарядів при стисненні або розтягуванні кристалів дістало назву п'єзоелектрики (від грецького слова «п'єзо» — тисну). Кристали з такими властивостями називають п'єзоелектриками.

У процесі дальших досліджень брати Кюрі виявили, що п'єзоелектричний ефект має властивість оборотності, тобто якщо на гранях кристала кварцу створити різнойменні електричні заряди, то кристал або стиснеться, або розтягнеться залежно від знаків зарядів на гранях.

Явище п'єзоелектрики знайшло практичне застосування лише під час світової війни



а — кварцова пластинка розташована між електродами; б — при стисненні й розтягненні на електродах з'являються електричні заряди.



а — для випромінювача ультразвуку пластинку з кристала сегнетової солі вирізали так, щоб її грані були перпендикулярні до кристалографічних осей; б — положення пластинки й кристалографічних осей в кристалі кварцу; в — один з видів випромінювачів з кристалом сегнетової солі; г — схема ультразвукової ванни.

1914—1918 рр., коли французький учений Поль Ланжевен скористався з нього, щоб виявляти підводні човни.

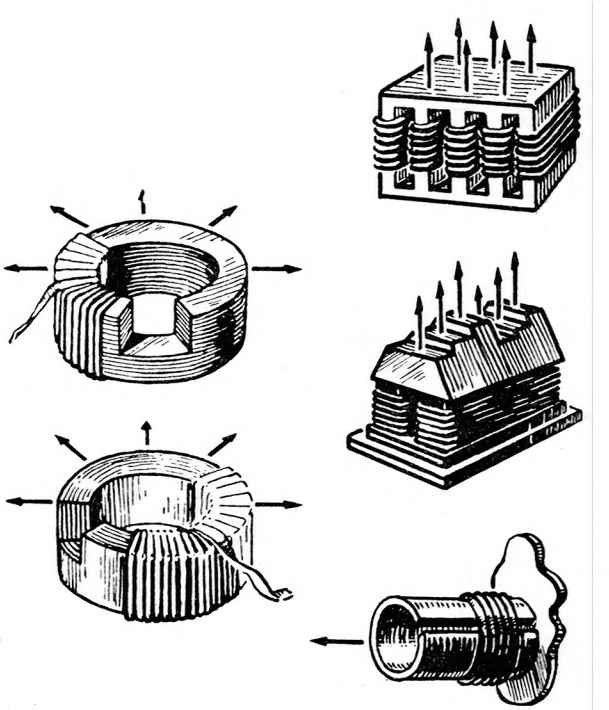
Під час руху гвинт човна породжує пружні хвилі. Пружна хвиля у воді являє собою переміжні стискання й розрідження, які поширюються з швидкістю, більшою ніж 1500 *м/сек*. При зануренні кристала кварцу в воду, в якій поширюється пружна хвиля, на його гранях виникають електричні заряди. Досліди Ланжевена дали змогу сконструювати прилад для вловлювання шуму від підводних човнів. Потім Ланжевен спробував заряджати грані кристала кварцу електрикою від генератора змінного струму високої частоти і встановив, що кристал при цьому робить коливання в такт змінюванню струму.

Але окрема пластинка кварцу випромінює ультразвук малої потужності. Для того щоб дістати більшу потужність коливань, Ланжевен зробив з маленьких кварцових пластинок одну велику. Більша кварцова пластинка, складена з багатьох маленьких, була названа мозаїкою. Кварцова мозаїка була вкладена між двома стальними листами, які були електродами й одночасно скріпляли її.

Для того щоб дістати більшу амплітуду коливань, Ланжевен скористався явищем резонансу. Була спочатку підрахована власна частота коливань пластинок, а потім прикладена змінна напруга, частота якої дорівнювала частоті коливань пластинок кристала. Дослідження Ланжевена заклали основу створення кварцових випромінювачів ультразвуку різних частот.

П'єзоелектричні властивості має також кераміка титанату барію. Виготовлені з неї випромінювачі ультразвуку мають ряд переваг перед кварцовими. Їх можна робити різної форми і розмірів.

Другий спосіб одержання ультразвуку був відкритий і досліджений так само не зовсім звичайно. У 1847 р., вивчаючи магнітні властивості металів, Джоуль виявив, що при пере-



Різні типи магнітострикційних випромінювачів.

магнічуванні електричним струмом зразки заліза й нікелю змінюють свої розміри. Стержень то зменшується, то збільшується в такт із зміною напряму струму в обмотці. Коливаючись таким способом, стержень здатний викликати коливання навколишнього середовища, наприклад повітря, тобто породити звук. При струмі високої частоти в середовищі виникає ультразвук.

Це явище дістало назву магнітострикції (від латинського слова «стриктус» — стиснення). Явище магнітострикції теж оборотне: при швидкому стисненні й розтяганні сердечника електромагніту, виготовленого з заліза або нікелю, виникає змінне магнітне поле. В обмотці при цьому виникає електрорушійна сила індукції. Якщо обмотка електромагніту замкнена, в ній потече змінний електричний струм, частота якого збігається з частотою коливань стержня.

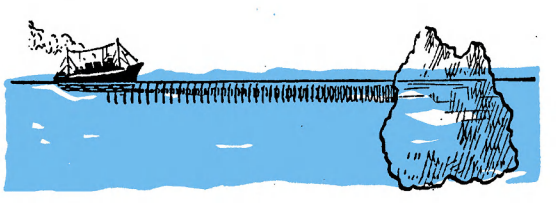
Таким чином, для одержання ультразвуку використовуються два цілком різні явища природи: п'єзоелектрика й магнітострикція.

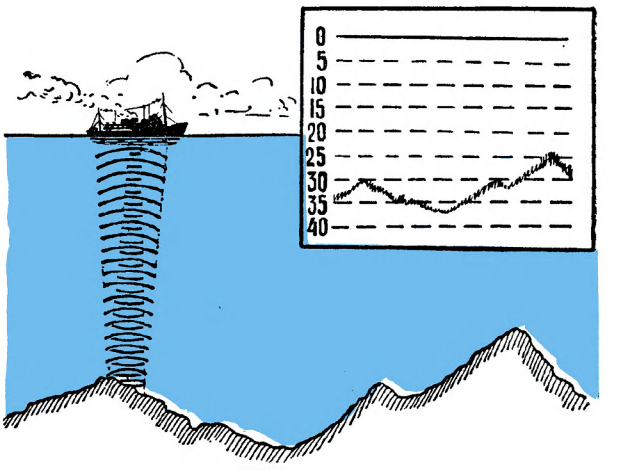
УЛЬТРАЗВУК У ТЕХНІЦІ І НА ВИРОБНИЦТВІ

Перші досліди практичного застосування звуку для цілей навігації були зроблені в 1837—1839 рр. При визначенні глибини моря пробували використати луну. Наслідки дослідів були не дуже втішними. Звук дзвона давав дуже слабку луну від дна, ледве-ледве чутну в загальному шумі моря.

Після невдалої спроби виміряти звуком глибину моря він був використаний для розв'язання іншого дуже важливого завдання.

Під час туману, коли світло маяків погано видно, дуже велика небезпека корабельної аварії. Кораблю важко ввійти у вузьку протоку бухти без світлових сигналів маяка. На допомогу мореплавцям прийшов звук дзвона. В центрі бухти напроти протоки розташовують під водою дзвін. Корабель, пливучи до гавані, опускає по бортах слухові труби. Слухові труби по бортах корабля нагадують вуха.





Зображення рельєфу дна, зроблене за допомогою автоматичного ультразвукового ехолота.

Але звучання дзвона під водою дуже слабке. Значно сильніший звук дає обертовий диск з отворами, через які продувають повітря. Цей пристрій називають сиреною.

Після перших спроб використати луну для вимірювання глибини моря до цього способу повернулись лише через кілька десятків років. У 1912 р. був сконструйований прилад, придатний для вимірювання глибин. Звук патрона, що розірвався з одного борту корабля, після відбивання від дна приймали на другому борту. Прилад назвали ехолотом. Максимальна глибина, на якій він діяв, була 150 *м*. А незабаром сталася подія, після якої ехолот знайшов інше застосування.

В Атлантичному океані в сильному тумані корабель-гігант «Титаник» на повному ходу зіткнувся з величезним айсбергом, який розпоров йому борт. Вода ринула у відсіки трюму, і корабель потонув протягом кількох хвилин. З того часу для виявлення перешкод на шляху корабля почали користуватися ехолотом. Його повернули з вертикального положення в горизонтальне, і він став виконувати роль лоцмана. Тепер його називають гідролокатором.

Тепер гідролокацію здійснюють за допомогою ультразвукових хвиль. Ультразвуковий промінь, посланий випромінювачем, зустрічаючи перешкоду, відбивається, повертається назад, і його приймає звукоприймач. Поси-

лаючи звук, реєструють час. Знаючи швидкість його поширення у воді, визначають відстань до перешкоди. Обмацуючи звуковим променем глибини моря, можна не тільки визначити наявність перешкоди, але й її форму. За допомогою гідролокаторів було знайдено багато затонулих кораблів.

Удосконалений гідролокатор випромінює ультразвук не безперервно, а через певні проміжки часу. Луну приймають кількома приймачами, які знаходяться один від одного на деякій відстані. Такий метод дає змогу точніше визначити відстань і напрям до перешкоди.

Широкого застосування дістав ультразвук у металургії. Ультразвук добре поширюється в металах. Це навело на думку використати луну для визначення якості металу. В тому разі, якщо всередині зразка є сторонні вкраплення, ультразвуковий промінь відбивається від них, як від перешкоди. Прилад, за допомогою якого виявляють тепер дефекти металів, називається дефектоскопом. Дефектоскопом перевіряють готові вироби, якщо побоюються, що під час їх виготовлення всередині появились якісь дефекти. Проте дефектоскоп дає змогу визначити лише наявність дефекту і відстань до нього від поверхні. Іноді треба знати форму і розмір дефекту. Для цього був створений ультразвуковий мікроскоп. Побудовано його так: ультразвуковий промінь «обмацує» дефект всередині металу, а на спеціальному екрані електронно-променевої трубки можна бачити зображення дефекту.

В техніці використовують ще одну властивість звуку — так званий звуковий вітер. Як відомо, тіло, що робить коливання високої частоти і досить великих амплітуд, не тільки примушує робити такі самі коливання частинки навколишнього середовища, але й викликає їх рух в бік поширення хвилі. Створюється постійний потік, який називають звуковим вітром. При випромінюванні ультразвуку в рідині це явище приводить до інтенсивного перемішування. Ультразвукова хвиля й супроводжуючий її звуковий вітер, досягаючи вільної поверхні рідини, примушують її фонтанувати.

На дні посудини з мінеральним маслом міститься випромінювач ультразвуку. Таким випромінювачем може бути кварцова пластинка. Посріблені поверхні пластинки служать обкладками, що їх приєднують до електричного генератора високої частоти. Завдяки оборотності п'єзоелектричного ефекту пластинка починає коливатися. Частота її коливань збігається з частотою коливань, створюваних генератором. Коливання пластинки передається навколишній рідині, в якій поширюються ультразвукові хвилі. Досягаючи поверхні рідини, вони створюють при малих амплітудах брижі. При досить великих амплітудах, коли сили поверхневого натягу рідини виявляються меншими від сил пружності, утворюється фонтан. Висота ультразвукового фонтану може досягати кількох десятків сантиметрів.

Фонтан рідини, утворений ультразвуком, має цікаві властивості. За його допомогою можна здобувати різні емульсії, тобто змішувати рідини, які в звичайних умовах не змішуються.

Ця обставина дала змогу фармацевтичній промисловості скористатися з ультразвуку для виготовлення ліків із добре роздрібнених сумішей рідких речовин, які не розчиняються одна в одній. Харчова промисловість використовує це явище для виготовлення різних соусів і приправ, наприклад майонезу, маргарину і т. п.

Промисловість, що виготовляє дрібнозернисті світлочутливі емульсії, які наносять на фотоплівку й фотопапір, так само використовує ультразвук. Знімки на фотопластинках, емульсія яких оброблена ультразвуком, допускають досить велике збільшення. При збільшенні знімків спотворення зумовлені розмірами світлочутливих зерен бромистого срібла. Чим дрібніші зерна (що й досягається при обробці ультразвуком), тим незначніші спотворення при збільшенні.

Ультразвук не тільки здатний подрібнювати не розчинювані одна в одній речовини і перетворювати їх в однорідну суміш, але сприяє і оборотному процесу. Якщо, наприклад, повітря, засмічене кіптявою, пилом і димом, піддати дії ультразвуку, то відбувається об'єднання великого числа дрібних частинок у крупні частинки, які легко осідають. Такий процес називають к о а г у л я ц і є ю.

Ультразвуковий фонтан обпікає вміщений у нього палець. Опік буде більш значним, якщо палець занурити безпосередньо в рідину над кварцовою пластинкою, яка випромінює ультразвук. Цю властивість ультразвуку вдалось використати для знищення бактерій і мікробів, якщо вони є в рідині. Ультразвукові методи дезинфекції дуже ефективні. Ними користуються для обеззаражування джерел води та водоймищ. Ультразвук виявляє згубну дію й на різного роду личинки, наприк-

лад на личинки малярійних комарів у болотах.

Якщо насіння рослин оброблене ультразвуком перед посадкою, то поліпшується його виростання й підвищується врожайність. Ультразвуком можна чистити й фарбувати тканини.

Застосування ультразвуку в техніці значно поширилось після відкриття явища кавітації. Вивчення цього явища почалось з того, що було виявлене ушкодження гребних гвинтів на швидкохідних морських суднах. Після недовгочасного строку служби добре відполіровані, нержавіючі гвинти кораблів були вкриті дрібними щербинками. Складалося враження, що черв'як роз'їдає поверхню металу. Таке руйнування його поверхні не може відбуватися навіть при тривалому перебуванні металу в воді. Аналогічно руйнувалися і лопаті гідротурбін. Для того щоб усунути це явище, треба було знайти причину, яка його породжує.

Встановити причину удалось після того, як було виявлено, що такому ж руйнуванню піддається металева поверхня електродів, нанесених на кварцову пластинку, якщо вона випромінює потужні ультразвукові коливання.

Завдання виявилося складним. Треба було розібратися в процесі поширення ультразвукових хвиль в рідині, розібратися в супроводжуючих цей процес явищах.

Коли створюються потужні пружні коливання рідини ультразвукової частоти, то в момент стиску досягаються дуже великі тиски. У наступний за стиском момент розрідження, тобто розтягнення рідини, через великі швидкості руху частинок виникають розриви рідини. Розриви настають легше там, де є частинки повітря або дрібні частинки домішок. Утворюються порожнини, які називають кавітаційними пузирками.

Слідом за розрідженням знов настає стискання, пузирок захлопується, а в цьому місці розвиваються колосальні тиски. Цей саме процес і називають кавітацією. Якщо такий процес проходить поблизу металевої поверхні, то під дією кавітаційних імпульсів тиску відбувається руйнування поверхні металу. Кавітаційні пузирки завдають ударів подібно до молотобійців. Удар одного пузирка слабкий, але таких ударів обрушуються тисячі, і поверхня металу руйнується.

Явище кавітації удається використати при обробці твердих крихких матеріалів, таких, як скло, фарфор, дорогоцінне каміння, надтверді сплави. Воно дає змогу чистити дуже забруднені й заржавілі металеві деталі. Процес очистки відбувається миттю. Тисячі повітряних пузирків, які розриваються всередині рідини, знімають іржу й очищають поверхню металу.

Ультразвук дуже легко може різати тверді або дуже крихкі тіла. При цьому не буває браку, немає зайвих відходів матеріалу в ошурки.

Особливу складність на виробництві являють собою фрезерні роботи. Ультразвук успішно справляється і з цим процесом. Цінність полягає в тому, що виключається складний обертальний рух фрези.

Ультразвукове долото спрощує обробні машини. Ультразвукова обробка економить час на виготовлення деталі, економить матеріал та інструмент і, таким чином, збільшує продуктивність праці.

Друга властивість ультразвуку дозволила йому міцно укріпитися в промисловості будівельних матеріалів — у новій галузі виробництва залізобетонних конструкцій, яка нещодавно почала розвиватися.

За допомогою ультразвуку можна перевірити якість бетонних і залізобетонних споруд. Якщо бетон під час кладки був недостатньо ущільнений, всередині його утворюються повітряні порожнини. Виявити їх своєчасно — це значить запобігти передчасному руйнуванню споруди. Для цього спеціальним ультразвуковим дефектоскопом промацують бетон і визначають розмір раковини, глибину її залягання.

Ультразвук допомагає також визначити якість бетонних споруд. Бетон набуває міцності не відразу. Під час укладання він рідкий, а потім помалу твердішає, перетворюючись у міцний масив,— вистигає. Швидкість ультразвуку в бетоні на різних стадіях вистигання різна, тому, вимірюючи швидкість поширення ультразвуку, можна судити про процес вистигання.

Якість бетону можна вважати дуже доброю, якщо швидкість ультразвуку в ньому перевищує 4500 *м/сек*. Якщо швидкість менша від 2300 *м/сек*, то якість дуже погана.

Широкий розвиток будівництва гідроелектростанцій, де укладають сотні тисяч кубометрів бетону, вимагає безперервного контролю за його якістю, і тут ультразвук незамінний.

Важливу роботу виконує ультразвук у виробництві цементу, кераміки та азбесту.

Міцність цих будівельних матеріалів залежить від того, наскільки дрібнозерниста їх структура. Механічне розмелювання будівельної маси не дає досить дрібних частинок. Якщо ж роздрібнювати цемент або азбест ультразвуком, частота якого дорівнює 450 тис. *гц*, то частинки виходять розміром у 12 мікронів. Таке тонке розмелювання будівельного матеріалу дуже сприятливо відбивається на його якості.

Наведені приклади промислового використання ультразвуку далеко не вичерпують усіх його можливостей. З вивченням властивостей ультразвуку коло його застосування стане ще ширшим і далі допомагатиме технічному прогресу виробництва.

Плавання і літання

ПЛАВАННЯ ТІЛ

Багато хто з вас дивився кінокартину «Загибель «Титаника». Основою для її сюжету була така подія: у квітні 1912 р. найбільший у той час океанський пароплав «Титаник» на всьому ході зіткнувся з плаваючою крижаною горою — айсбергом. Корабель потонув, 1490 чоловік загинуло.

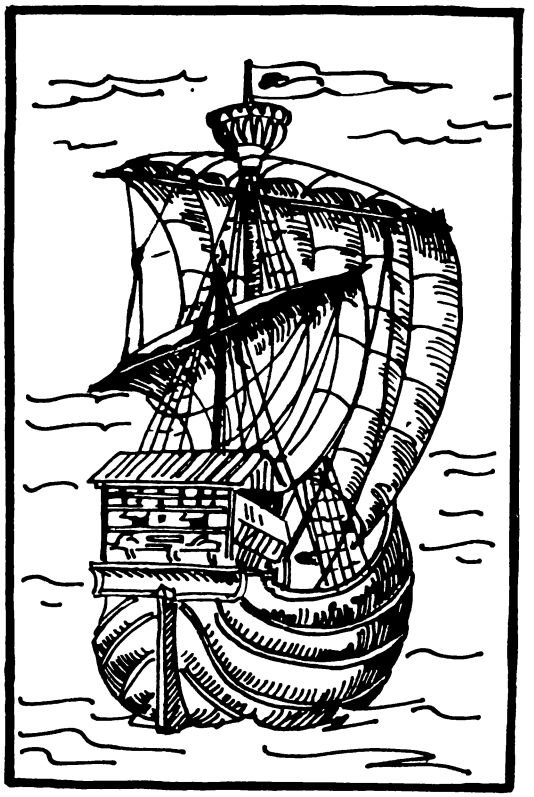
Звідки в океані беруться плаваючі крижані гіганти? Чи в усякому морі можна потонути? Чому не тонуть важкі стальні кораблі — справжні плаваючі міста, а монета, кинута у воду, тоне?

Що таке батисфера? А батискаф? Для чого люди плавали в XX ст. через океан на плоту? Як підняти затонулий корабель з дна морського?

Про це і про багато чого іншого можна дізнатися з цієї статті.

ТАЄМНИЦЯ ОСТРОВА ПАСХИ. ЛЮДИ НА ПЛОТУ. ТІЛЬКИ ЗДОГАДИ

На далекому, загубленому в Тихому океані острові Пасхи були виявлені таблички з написами на невідомій мові й колосальні кам'яні статуї людей і богів; вага статуй вимірювалася тоннами. Написів ніхто не вмів прочитати. Було незрозуміло, як створювались ці кам'яні



Каравела Колумба «Санта-Марія».

велетні, а ще таємничіше було те, що такі самі велетні були виявлені за «тридев'ять земель» від острова Пасхи — в Південній Америці, в Перу.

Деякі вчені висловлювали припущення про спільність походження цих фігур. Але якщо такі статуї робили люди одного й того самого народу, то як вони могли перебратися через океан в ті далекі часи?

Норвезький учений Тур Хейєрдал вирішив довести, що й багато віків тому люди могли перепливати океан. Він відправився в Південну Америку й збудував там пліт, що являв собою точну копію стародавніх перуанських суден: дев'ять товстих колод із бальзових дерев, зв'язаних вірьовками з рослинних волокон, чотирикутний парус, бамбукова хатина-каюта і рульове весло на кормі. Вивчаючи перекази й міфи полінезійців, Хейєрдал установив, що багато легенд жителів островів присвячено богу й вождю Кон-Тікі, який колись приплив через океан зі Сходу. На честь його Хейєрдал і п'ять його товаришів назвали свій пліт «Кон-Тікі».

Більше трьох місяців тривала подорож шести відважних дослідників. Близько 8000 *км* пропливли вони на плоту, довівши високі морехідні якості стародавнього перуанського корабля. Про цей подвиг, зроблений в ім'я науки, Хейєрдал розповів у своїй захоплюючій книзі «Подорож на «Кон-Тікі».

Ну, а коли люди навчились плавати на плотах? Про це можна тільки догадуватися. Ясно лише, що до різних народів це вміння прийшло в різний час. Спробуємо уявити собі таку картину.

Всім відомий вірш Некрасова «Дід Мазай та зайці». Під час поводі зайчики інстинктивно вискакували на дерева, які пливли мимо них. Певно, й люди, потрапивши в повідь, намагалися ухопитися за що-небудь, що вже пливло по воді. Поступово вони зрозуміли, що дерево може допомогти перемагати водні перешкоди. Дерева могли випадково зчепитися гілками, а людина могла помітити, що на двох колодах легше пливти, ніж на одній. Можливо, так і зародилась ідея плоту.

А десь в іншому місці Землі, де росли великі й товсті дерева, людина навчилася плавати на дереві верхи, осідлавши його, немов коня. Дупло, в якому можна було зручно сидіти, не замочивши ніг, можливо, стало прообразом видовбаного човна.

«Кон-Тікі».

ЯК РІДИНИ ЗУСТРІЧАЮТЬ «ГОСТЕЙ»

Зануримо в посудину з водою кусок пробки або дерева. Як тільки віднімемо руку, вода виштовхне їх на поверхню. Але так буде не з усіма тілами. Є вислів: «Пішов каменем на дно». Справді, камінь або звичайний металевий ключ відразу піде на дно. Щоправда, рідина виштовхує вгору і тіла, які в ній тонуть, та тільки їй це не вдається: не вистачає у рідини сили, щоб їх виштовхнути.

Прив'яжемо до металевої ложки тонку гумову нитку так, щоб ложка висіла горизонтально, як показано на рис. 1 праворуч, і виміряємо довжину нитки. Потім опустимо нашу ложку, підвішену на гумці, в посудину з водою. Вимірявши лінійкою довжину гумки в цьому положенні, ми переконаємося, що вода виштовхує ложку вгору — нитка стала коротшою.

Силу, яка виштовхує тіло з рідини, називають **виштовхувальною**. І ще одну вдалу назву вигадали люди для цієї сили — **підтримувальна**.

Пробка плаває на поверхні посудини з водою, неначе її хтось підтримує. Коротша стала в воді гумка, на якій висить ложка, нібито хтось невидимий виштовхує ложку знизу. Обидві ці назви: «виштовхувальна сила» або «підтримувальна сила» — цілком рівноправні й означають одне й те саме.

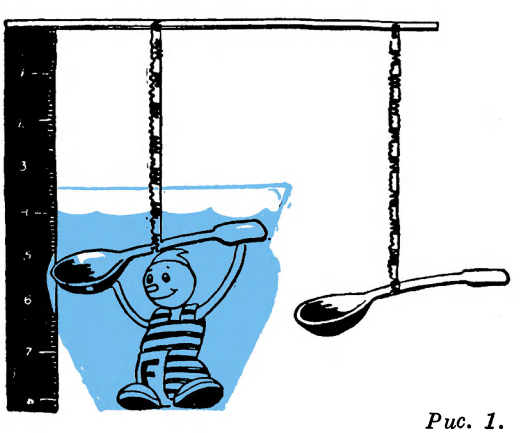


Рис. 1.

А тепер кілька питань на кмітливість. Є така гімнастична фігура, коли, спираючись на руки, тримають витягнуті ноги під прямим кутом до тулуба. Чому таку фігуру легко зробити у воді?

Чому боляче лежати на морській гальці на березі, а не боляче лежати на таких самих камінцях, занурившись у море? Чому вагу відра з водою ми починаємо відчувати тільки з того моменту, коли відро з'являється над поверхнею води в колодязі? Спробуйте відповісти на ці питання самостійно.

Куди ж напрямлена виштовхувальна сила? Можна легко догадатися, що ця сила напрямлена **вертикально вгору**. Адже гумова нитка, до якої підвішена ложка в воді, скорочуючись, зберігає своє прямовисне положення і не відхиляється кудись убік.

Рис. 2.

Прив'яжемо короткою ниткою до пробки такий вантаж, щоб він затягнув її під воду. Прямовисно натягнута нитка (рис. 2) показує, що виштовхувальна сила, яка діє на пробку, напрямлена вертикально вгору.

СПРОБУЄМО ТАНЦЮВАТИ НЕ ВІД ПЕЧІ. СПОГАДИ, ЯКІ НЕ У ВСІХ Є. РИСУНКИ-ПОМІЧНИКИ

Усім відомий вислів «танцювати від печі». Тепер він вживається тільки в переносному розумінні і означає: починати якусь справу з самого початку. Щоб не затягнути нашого оповідання, ми не будемо весь час «танцювати від печі». Скористаємося з уже відомих фактів. Згадаймо, що рідина тисне у всі боки — і знизу вгору, і зверху вниз, і зліва направо, і справа наліво, і в будь-якому іншому напрямі, що тиск усередині рідини дорівнює її питомій вазі, помноженій на висоту стовпа рідини.

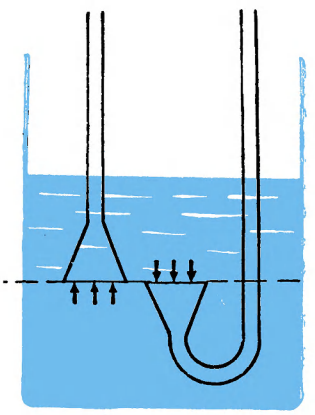


Рис. 3. Прилади, що вимірюють тиск, називаються манометрами. Два манометри, мембрани яких розташовані так, як показано на рисунку (для простоти самі манометри не намальовані), покажуть один і той самий тиск. Це означає, що рідини тиснуть як зверху вниз, так і знизу вгору і що тиск на одній і тій самій глибині однаковий. Напрям тиску рідини на мембрани показаний стрілками.

З цього виходить, що в будь-якій рідині тиск на одній і тій самій глибині однаковий (рис. 3 і 4), а чим глибше, тим він більший.

Той, хто глибоко поринає, почуває біль у вухах від тиску води на барабанну перетинку. Учені проробили такий дослід: поклали всередину металевої клітки кусок дерева, а клітку на міцному тросі опустили глибоко в море. Коли її вийняли, виявилось, що колосальний тиск води так сильно стиснув кусок дерева, що він, втративши плавучість, тонув у воді.

На рис. 5 показано дослід Паскаля. У днищі міцної дерев'яної бочки він зробив вузький отвір і вставив туди довгу трубку, через яку вливав воду. Коли бочка й трубка заповнились, тиск води розірвав бочку.

Подивимось на рис. 6. Тиск рідини дорівнює її питомій вазі, помноженій на висоту стовпа. Це означає, що тиск на рівні дна у всіх посудинах однаковий, якщо в них налита та сама рідина до однакової висоти. Зразу й не віриться. У цьому й полягає гідростатичний парадокс[1].

Рис. 5. Дослід Паскаля.

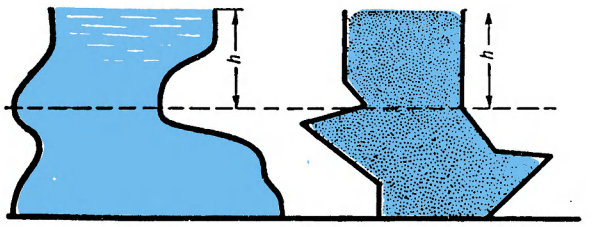


Рис. 4. Ліворуч посудина з водою, праворуч — з ртуттю. На якій-небудь глибині h тиск всередині посудини з водою скрізь однаковий. Тиск ртуті на цій глибині так само буде однаковий, але він буде в 13,6 раза більший, ніж тиск води на цій глибині; бо питома вага ртуті 13,6 $\frac{Г}{см^3}$, а води — 1 $\frac{Г}{см^3}$. Показано також, що висоту стовпа рідини слід завжди відраховувати від її вільної поверхні. Форма посудини ролі не відіграє.

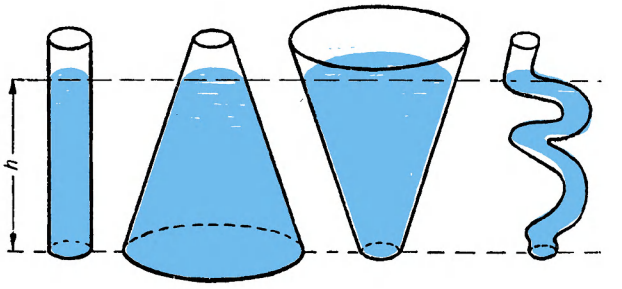


Рис. 6. Дивовижні посудини. Гідростатичний парадокс.

[1] Парадоксом ми називаємо яке-небудь твердження, що розходиться з загальноприйнятою думкою, або таке, яке на перший погляд здається дивовижним і безглуздим, але виявляється справедливим.

ЗА ДОПОМОГОЮ СЛАВНОЗВІСНОГО ГОЛЛАНДЦЯ ПЕРЕМАГАЄМО ВИЩУ МАТЕМАТИКУ. РОЗУМНИЙ ЧОВНЯР

У рідину вміщено куб, циліндр і паралелепіпед, розміщені, як показано на рис. 7. Будемо говорити поки що тільки про циліндр. Тиск на одній і тій самій глибині однаковий, тому сили тиску, що діють на бічні стінки циліндра, зрівноважуються. Але сила тиску, що діє на верхню основу циліндра, буде меншою від сили тиску, яка діє на його нижню основу, тому що вони розміщені на різній глибині (рис. 8), адже чим глибше, тим тиск у рідині більший. Отже, рівнодійна всіх сил, що діють з боку рідини на циліндр, буде напрямлена вертикально вгору. Це й є виштовхувальна сила.

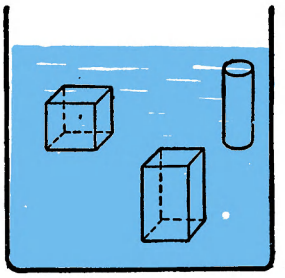


Рис. 7.

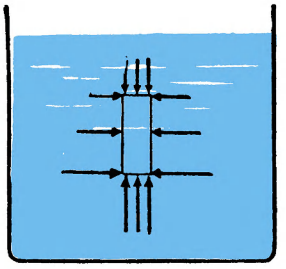


Рис. 8. Дія сил на циліндр.

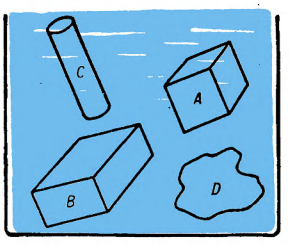


Рис. 9.

Для куба й паралелепіпеда будуть справедливими такі самі міркування.

Нам відомо, від чого виникає виштовхувальна сила. Для таких простих випадків її не важко було б і обчислити. На рис. 9 показані ті самі тіла *A*, *B* і *C*, що і на рис. 7, але розміщені вони похило. Спробуємо тепер довести, що на ці тіла діє виштовхувальна сила, й обчислити її. Навряд чи нам це удасться! Ну, а якщо тіло має якусь неправильну форму? Виявляється, і тут можна обчислити виштовхувальну силу, але для цього вже треба знати вищу математику.

А можливо, можна знайти легший і коротший шлях? Виберемо у провідники знаменитого голландського математика й фізика Стевіна. У кінці XVI ст. вийшла його книга, в якій

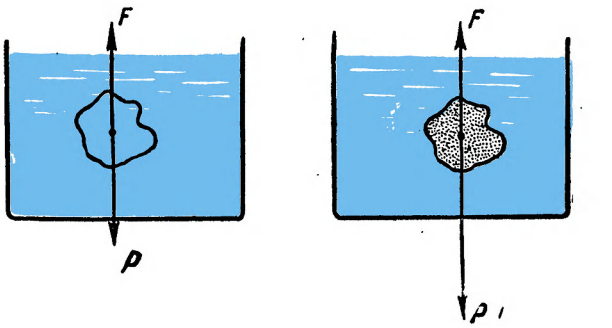


Рис. 10.

дано надзвичайно простий і наочний прийом для визначення виштовхувальної сили. Пізніше цей прийом, правда, дещо змінений, став називатися «принципом твердніння».

Нехай у посудину налито рідину. Уявімо собі, що частина її затверділа, але вага цієї частини лишилася незмінною. Очевидно, рівновага в посудині не порушилась. Але рівновага можлива лише тоді, коли напрямлена вгору виштовхувальна сила дорівнюватиме вазі даної частини рідини.

В думці видалимо затверділий об'єм рідини і вставимо на його місце тверде тіло такого ж самого об'єму й форми (рис. 10). Рідина буде «обманута». Адже для неї нічого не змінилося, і вона буде тиснути на це тіло з такою самою силою, як раніше тиснула на рідину.

Отже, якщо тіло цілком занурене в рідину, то на нього діє вертикально вгору виштовхувальна сила, що дорівнює вазі рідини в об'ємі тіла.

На рис. 11 показано, що на тіло, частково занурене в рідину, буде діяти виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі рідини в об'ємі зануреної частини тіла.

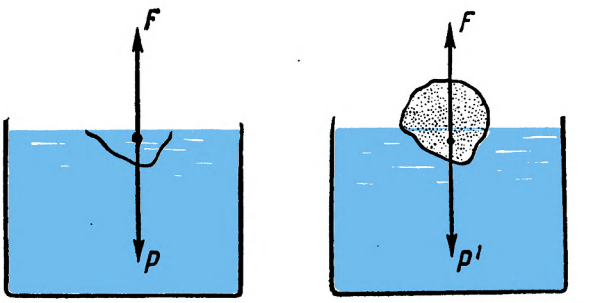


Рис. 11.

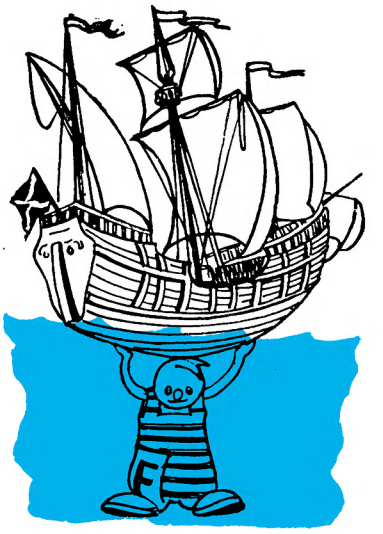
Звичайно ці формулювання об'єднують в одне.

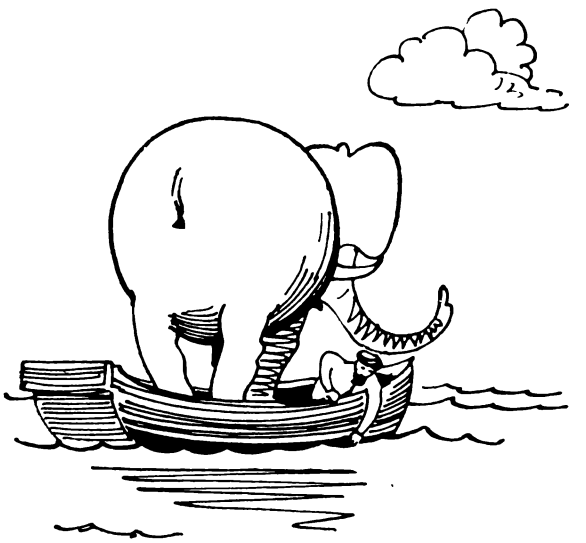
У наш час закон, який вперше був відкритий Архімедом, читаємо так: *На тіло, частково чи повністю занурене в рідину, діє вертикально вгору виштовхувальна сила, що дорівнює вазі рідини, виштовхуваної тілом.* Цікаво, що справедливість закону Архімеда для газів зрозуміли значно пізніше — через багато століть.

Таким чином, стало ясно, що виштовхувальна сила не залежить ні від нахилу тіла, ні від його форми.

У старій східній казці розповідається:

«Цар обіцяв дати тому, хто зважить його слона, стільки золота, скільки важить сам слон. Бідняк-перевізник поставив слона в свій великий човен і позначив той рівень, до якого він занурився у воду. Потім, вивівши слона на берег, він навантажив човен золотом до попередньої позначки. Вага золота дорівнювала вазі слона». Неграмотний човняр, звичайно, не знав закону Архімеда. Він тільки зміркував, що коли два вантажі мають однакову вагу, то вони будуть занурювати човен у воду до одного й того самого рівня.





ПІШОХІДНІ ДОРІЖКИ І ЛЕГЕНДАРНІ ОПОВІДАННЯ. АРХІМЕД ТА ЙОГО ВІДКРИТТЯ

У деяких країнах біля пішохідних доріжок стоять щити, на яких намальовані заєць, що біжить, і черепаха, що повзе. Написів нема ніяких, але щити коротко й образно нагадують пішоходам, що однаково небезпечно бігти через дорогу швидко, як заєць, або повзти повільно, мов черепаха.

Подібну роль у свідомості людей відіграють легендарні оповідання про історичних осіб і про великих учених. Часто ці оповідання називають історичними анекдотами. Нехай вони і не завжди точно відповідають фактам, але зате вони цікаві, повчальні й настільки барвисті, що запам'ятовуються на все життя. Архімеду в одному з таких оповідань приписували гордий вислів: «Дайте мені точку опори, і я зрушу Землю». Ці слова знає тепер кожен школяр. Вони нагадують нам про людину, яка відкрила закони важеля.

Діяльність Архімеда була дуже різнобічною. Популярність його серед сучасників була настільки велика, що стала приводом до виникнення безлічі легенд. Ось одна з них.

Гієрон, ставши царем Сіракуз, вирішив на знак вдячності за свої успіхи принести в дар безсмертним богам золоту корону. Він замовив її майстру і наказав відважити йому потрібну кількість золота. Той на призначений строк виготовив корону, і, здавалось, вага її точно відповідала вазі відпущеного золота. Але царю доповіли, що замість частини золота майстер домішав таку ж частину срібла. Гієрон розгнівався, але не міг знайти способу викрити майстра в нечесності. Він звернувся за допомогою до Архімеда.

Як розповідають, Архімед зробив два злитки — один із золота, другий із срібла — кожен такої самої ваги, якої була корона. Потім наповнив водою посудину до самих вінець, занурив в неї срібний злиток і позначив, скільки води він витіснив. При цьому йому вдалося встановити, що вага срібного злитка відповідає цілком певному об'єму води.

Повторивши дослід із злитком золота, Архімед побачив, наскільки менший об'єм він за-

ймає порівняно з об'ємом рівного йому вагою злитка срібла. Потім, опустивши в посудину корону, знайшов, що води витекло більше, ніж при зануренні золотого злитка. А проте вага кожного злитка дорівнювала вазі корони! Користуючись відкритим ним законом, Архімед розрахував, скільки золота й скільки срібла пішло на виготовлення корони. Таким чином була виявлена домішка срібла, а отже, й несумлінність майстра.

Дві обставини важливі в цій легенді. По-перше, Архімед знайшов спосіб для вимірювання об'ємів твердих тіл складної форми. По-друге, щоб виявити домішку срібла в золоті, йому довелося застосувати поняття питомої ваги. Це само собою було вже великим відкриттям.

Для того щоб розповісти про закон плавання, відкритий Архімедом, наведемо уривок з його праці, використавши для полегшення рисунки.

На рис. 12 зображено якийсь об'єм рідини V_1 з вагою A (тіло *1*). Візьмемо такий самий об'єм металу. Він важчий від рідини, нехай його вага буде $A + B$ (тіло *2*). Рідина з такою самою вагою $A + B$ займе якийсь об'єм V_2 — більший, ніж V_1 (тіло *3*). І, нарешті, уявімо собі, що підібрано такий матеріал, легший від рідини, об'єм якого V_2, а вага A (тіло *4*).

Складемо з тіл *1* і *3* нове тіло *5*. Об'єм його буде $V_1 + V_2$, а вага $A + A + B = 2A + B$. Із тіл *2* і *4* складемо тіло *6*; об'єм його $V_1 + V_2$, а вага $A + A + B = 2A + B$.

Ми приймемо два твердження Архімеда без доведень і, грунтуючись на них, виведемо третє його твердження.

Розберемо перше твердження Архімеда: *Тіла, які мають при рівному об'ємі однакову з рідиною вагу, плаватимуть, цілком занурившись у рідину.*

Об'єми й вага тіл *5* і *6* однакові. Тіло *5* цілком складається з рідини, отже, тіло *6* буде плавати в цій рідині.

Друге твердження: *Тверді тіла, легші від рідини, занурюючись в рідину, прямують вгору з силою, яка дорівнює різниці між вагою рідини, взятою в об'ємі цих тіл, і вагою самих тіл.*

Розглянемо тіла *3* і *4*. Тіло *4* легше від рідини, і рівний йому об'єм рідини *3* важить на B більше. Це означає, що коли тіло *4* занурити в рідину, то воно буде прямувати вгору з силою B.

Довівши справедливість двох попередніх тверджень, Архімед міг на основі їх довести і справедливість третього: *Тіла, важчі від рідини, опущені в неї, занурюються дедалі глибше, поки не досягнуть дна. Перебуваючи в рідині, вони втрачають своєї ваги стільки, скільки важить рідина, яку взято в об'ємі цих тіл.*

Повернемося до складного тіла *6* (рис. 12). Якщо на одну його частину — тіло *4* — діє

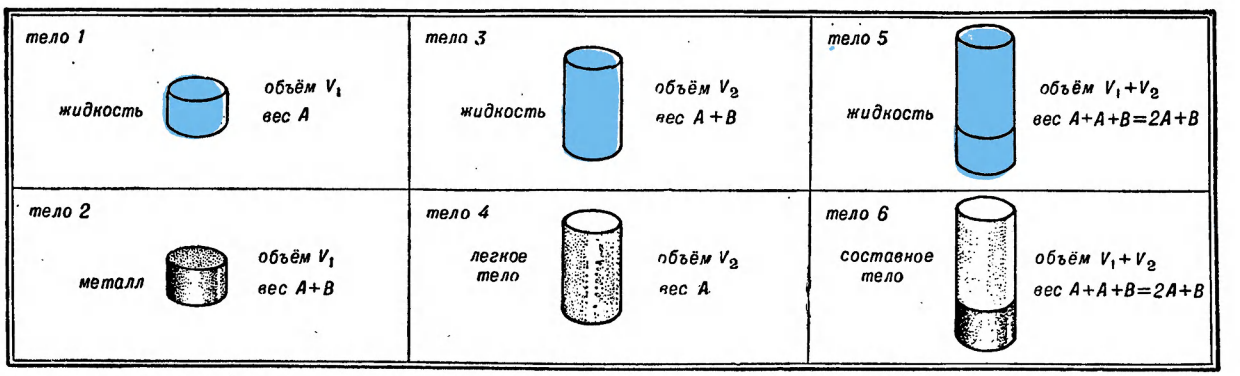


Рис. 12.

вгору сила B і (як ми вже говорили) все тіло плаває в рідині, то це означає, що на другу його частину — тіло *2* — діє так само сила B, але напрямлена вниз (рис. 13). Отже, тіло *2*, вага якого в повітрі $A + B$, в рідині тягне вниз із силою B, тобто його втрата у вазі дорівнює A. Це якраз стільки, скільки важить рідина в його об'ємі (порівняємо тіла *1* і *2*). Ясно, що залишене на самого себе тіло *2* тонутиме.

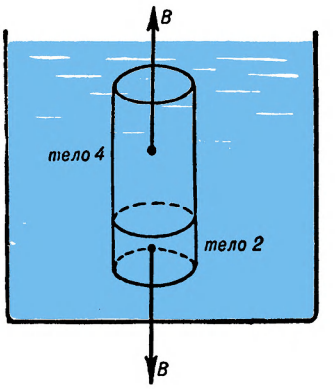


Рис. 13.

Роботи Архімеда відзначаються простотою й доступністю для розуміння. Багато виведених ним законів лягли в основу сучасної науки.

Прекрасна й повчальна його біографія. Блискуча освіта й живий розум сполучалися в ньому з наполегливістю й працьовитістю. Вся його наукова діяльність була пов'язана з життєвими потребами. Вражає різнобічність його праць з різних галузей знання: з астрономії, фізики, математики, механіки, інженерної справи.

Недарма легенди, що овіяли славою його ім'я, дійшли до наших днів.

СЕРЕДНЯ ПИТОМА ВАГА. ПІДВОДНИЙ ЧОВЕН. АВТОНОМНИЙ ВОДОЛАЗ

Дано найрізнорідніший набір предметів, наприклад: людина, радіоприймач і книга. Чи можна якось «усереднити» їх вагу? На перший погляд таке завдання здається безглуздим.

Уявімо собі тіло, цілком занурене в рідину. Для зручності міркувань напишемо поруч формули виштовхувальної сили й ваги тіла.

Виштовхувальна сила дорівнює питомій вазі рідини, помноженій на об'єм тіла. Вага тіла дорівнює питомій вазі тіла, помноженій на об'єм тіла:

$$\underset{\text{(виштовхувальна сила)}}{F} = \underset{\text{(питома вага рідини)}}{d_р} \times \underset{\text{(об'єм тіла)}}{V};$$

$$\underset{\text{(вага тіла)}}{P} = \underset{\text{(питома вага тіла)}}{d_т} \times \underset{\text{(об'єм тіла)}}{V}.$$

З порівняння цих формул видно, що коли питома вага тіла дорівнює питомій вазі рідини, то тіло буде плавати в ній на тій глибині, на якій ми його помістимо. Якщо питома вага тіла менша від питомої ваги рідини, то тіло випливе на поверхню. В міру того як воно виплива-тиме, об'єм його зануреної частини (а отже, і виштовхувальна сила) зменшуватиметься. Тіло плаватиме на поверхні рідини, починаючи з того моменту, коли виштовхувальна сила дорівнюватиме його вазі. А якщо питома вага тіла більша від питомої ваги рідини, то тіло піде на дно.

Спинимося докладніше на останньому випадку: питома вага заліза 7,8, а води — 1. Таким чином, ми довели, що залізо ніколи не плаватиме в воді. Ну а як же тоді плавають кораблі і підводні човни, зроблені з металу?

Тепер замислимося над нашим доведенням. Адже поняття питомої ваги ми застосовуємо лише для суцільних і однорідних тіл. Значить, наш висновок правильний і означає, що суцільний кусок заліза ніколи не плаватиме в воді. Мислено утворимо всередині залізної кулі порожнину. Поділимо вагу такої кулі на її об'єм і знайдену величину назвемо середньою питомою вагою цього тіла. Формула середньої питомої ваги цілком аналогічна формулі питомої ваги:

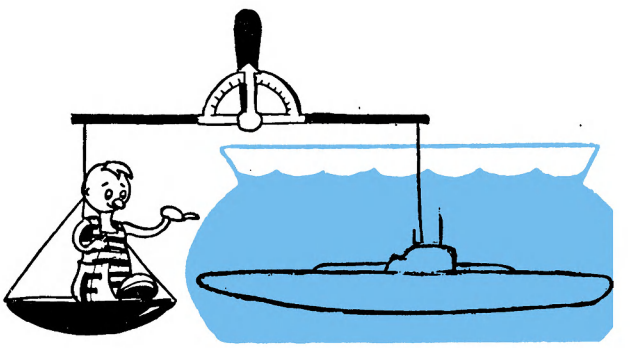
$$d\ (\text{питома вага}) = \frac{P(\text{вага суцільного й однорідного тіла})}{V\ (\text{об'єм цього тіла})},$$

$$d_{ср}(\text{середня питома вага}) =$$

$$= \frac{P\ (\text{вага неоднорідного тіла з порожниною})}{V\ (\text{об'єм цього тіла})}.$$

Так само як плавання суцільних тіл визначається їх питомою вагою, плавання несуцільних тіл визначатиметься їх середньою питомою вагою. Підводний човен плаватиме на певній глибині, не опускаючись і не підіймаючись, якщо його середня питома вага дорівнюватиме питомій вазі морської води.

Щоб обчислити середню питому вагу човна, треба скласти вагу його корпусу з вагою всього,



Перегони підводного скутера та морської черепахи.

що в ньому знаходиться (людей, двигунів, акумуляторів і т. д.), і поділити знайдену суму на об'єм човна. Тепер зрозуміло, що задача про «усереднення ваги» людини, радіоприймача та книги має смисл.

В той час як питома вага — величина стала, середня питома вага може змінюватися. Це — глибока й принципіальна різниця. Набравши в баластні цистерни води, підводний човен занурюватиметься в глибину моря. Його середня питома вага тепер більша від питомої ваги морської води. Вигнавши стисненим повітрям воду з баластних цистерн, підводний човен починає випливати. Зверніть увагу, що підводний човен зберігає свій об'єм незмінним і змінює середню питому вагу, змінюючи свою загальну вагу. Зауважимо, що він не міг би плавати без так званих горизонтальних рулів: навіть найнезначніша різниця між вагою й виштовхувальною силою гнала б його або на дно, або на поверхню.

Інакше змінює свою середню питому вагу «автономний» водолаз. Звичайно водолаз дістає повітря з поверхні через гумовий шланг. А одягнений в скафандр автономний водолаз носить запас стисненого повітря з собою в спеціальних балонах. Для того щоб піднятися на поверхню, він збільшує свій об'єм, впускаючи в скафандр надлишкову кількість повітря.

«СТЕЛЯ» І ДНО ОКЕАНУ. «ПІДВОДНІ ЛЕГЕНІ» І СТАЛЬНІ ШКАРАЛУПИ

За даними сучасних досліджень, найбільша глибина в океані дорівнює приблизно 11 *км*. Підводні ж човни на глибину, більшу від 250 *м*, опускатися не можуть, бо їх корпус не витримує великого тиску води. Адже на такій глибині на кожен квадратний сантиметр поверхні діє сила приблизно в 25 *кГ*. Образно кажучи, підводний човен рухається тільки по «стелі» океану.

Ще в гіршому становищі перебуває водолаз. Якщо його скафандр зроблено з м'якої водонепроникної тканини, то зовнішній тиск води передається на самого водолаза. І більш ніж на глибину близько 150 *м* в ньому опускатися не можна. Тому був створений жорсткий скафандр. Він являє собою ніби міцний футляр і захищає від тиску води. Водолаз зовні нагадує закованого в лати середньовічного рицаря. У таких скафандрах можна опускатися глибше (до 250 *м*), ніж у м'яких, але широкого розповсюдження вони не дістали, тому що незручні для роботи під водою. Їх використовують головним чином для підводних спостережень.

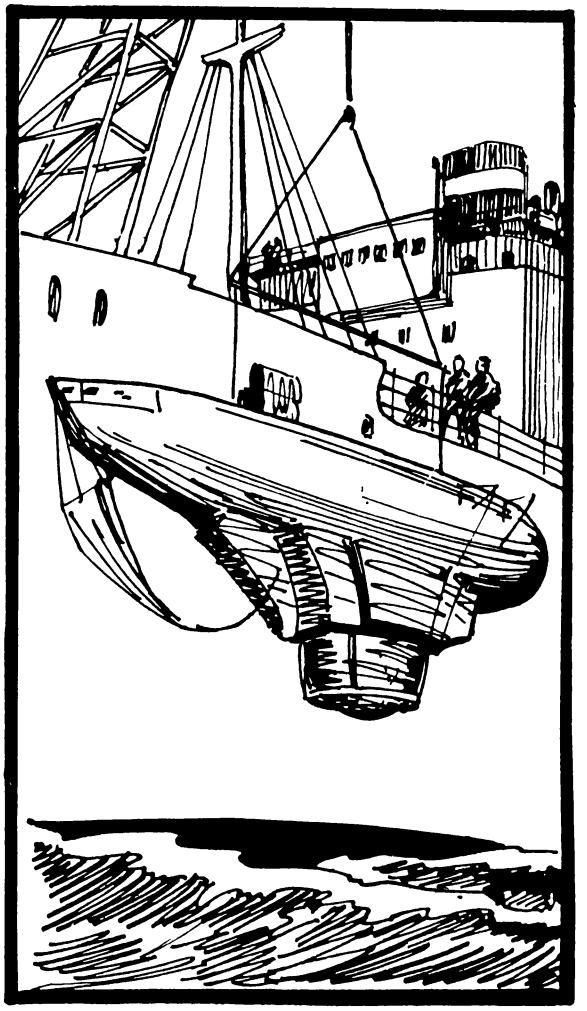
У фантастичному романі В. Бєляєва «Людина-амфібія», написаному в 30-х роках, дитині зробили операцію, після якої вона могла дихати не тільки легенями, але й жабрами. На очах у людини-амфібії були великі опуклі окуляри, а одяг її складався з блискучої луски. Це була фантазія письменника.

Але на наших очах вона перетворюється в дійсність. За останнє десятиріччя великого розвитку набуло підводне плавання. Люди годинами плавають під водою, вивчаючи життя моря та його мешканців. На ногах у них гумові ласти, очі й ніс закрито водонепроникною півмаскою, а в роті мундштук, з'єднаний з балонами стисненого повітря — а к в а л а н г о м, що знаходиться за спиною. В перекладі на українську мову «акваланг» — підводні легені.

Озброєні аквалангами люди спускаються під воду не тільки для дослідження рослинного й тваринного життя океану, а також для підіймання затонулих вантажів та археологічних робіт. Плавання під водою й підводне мисливство стали новим видом спорту.

Один з родоначальників підводного плавання француз Ів Кусто сконструював навіть підводний скутер, який може тягнути людину під водою з швидкістю 10 *км/год* (див. рис. на стор. 285). Він навіть може буксирувати кілька чоловік, але швидкість його при цьому значно знижується.

З освоєнням підводного плавання інтенсивно просунулось вперед вивчення «стелі» океану. Але людина не відмовилася від думки обслідувати його дно. Вперше глибоко в океан вона проникла в міцному металевому циліндрі. В дальшому для глибокопідводних досліджень почали застосовувати стальні кулі з ілюмінаторами з товстого кварцового скла — б а т и с ф е р и.



Батискаф, готовий до занурення.

У 1934 р. американським вченим Вільяму Бібу та Отісу Бартону вдалося опуститися в батисфері на глибину близько 1 *км*. Під час спуску вони виявили нові види риб.

За допомогою батисфер було проведено багато цікавих досліджень. Однак ці апарати мали великий недолік: вони були зв'язані тросом з кораблем. Трос дозволяв батисфері пересуватися лише по вертикалі, а обрив його означав неминучу загибель.

Вивченням морських глибин захопився знаменитий дослідник стратосфери бельгійський професор Пікар. Він вирішив не тільки піднятися вище за всіх вгору, але й опуститися глибше за всіх в океан. Пікар сконструював для занурення на великі глибини б а т и с к а ф.

Дослідники й прилади розміщуються в стальній гондолі, що має форму кулі, яка укріплена під наповненим бензином металевим довгастим «поплавком». Питома вага бензину 0,8 $Г/см^3$, тому оснащений таким поплавком підводний корабель має великий запас плавучості. Для занурення використовується баласт стальних дробинок, що знаходяться в спеціальній камері. Вони утримуються електромагнітом і можуть бути відразу викинуті на випадок небезпеки.

30 вересня 1953 р. батискаф, в якому знаходився Пікар з сином, досяг глибини 3150 *м*. Дослідники пробули під водою 2 години 20 хвилин і безперервно проводили кінозйомки. На випадок зустрічі з небаченими морськими потворами батискаф був постачений навіть глибоководною гарматою.

У другому батискафі, збудованому у Франції за проектом інженера Вільяма, 15 лютого 1954 р. Гуо і Вільям встановили новий рекорд занурення, опустившись на глибину 4050 *м*.

Тепер удосконалені батискафи постачені двигунами й гвинтами і можуть уже самостійно пересуватися в будь-якому напрямі. Нема сумніву, що ближчим часом людина зуміє досягнути ще більших глибин.

Може здатися, що на великій глибині, під колосальним тиском 800—1000 $кГ/см^2$, вода так стиснута, що вага її в об'ємі батискафа (або, інакше кажучи, виштовхувальна сила) буде настільки великою, що може перешкоджати

дальшому зануренню. Але це не так! Адже рідини майже не стискуються. Тому й виштовхувальна сила практично не змінюється на глибині.

Відомий такий дослід: відкриту ебонітову посудину від зіпсованого акумулятора заповнюють водою і прострілюють з дрібнокаліберної гвинтівки. Тому що куля проходить крізь шар рідини за дуже короткий час, вода не встигає піднятися вгору і стискується на величину об'єму кулі. Тиск за цю мить настільки зростає, що посудина розлітається на шматки. Коли ж стріляють у порожню посудину, то в ній появляються тільки дві невеличкі дірочки. Тепер зрозуміло, чому підводний човен гине, коли на деякій відстані від нього вибухає глибинна бомба. Практична нестискуваність рідини використовується і в батискафі. В той час як товщина стальних стінок порожнистої гондоли дорівнює 9 *см*, стінки бензинового поплавка мають товщину лише кілька міліметрів.

УПЕРТЕ ПОЛІНО. ЦЕНТР ТИСКУ

Поліно ніколи не плаватиме стоячи. Скільки б ми не намагались встановити його вертикально, вперте поліно падатиме набік і плаватиме тільки плазом (рис. 14). Щоб зрозуміти, чому так виходить, доведеться оглянутися назад.

Куди напрямлена виштовхувальна сила? Чому вона дорівнює?

Відповісти на ці питання може кожен шестикласник. Та чи багато хто замислювався над тим, до якої ж точки тіла прикладена виштовхувальна сила?

Виявляється, точка прикладання виштовхувальної сили знаходиться в центрі ваги витісненого тілом об'єму рідини. Ця точка називається центром тиску. Тепер зрозумілі химери упертого поліна, яке весь час лягає набік. Тільки воно ледве відхилялося від вертикального положення, як пара сил — вага й виштовхувальна сила — перекидала його (рис. 15).

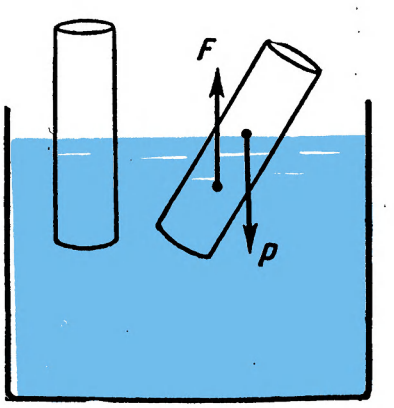


Рис. 15. Вага і виштовхувальна сила «кладуть» поліно набік.

ВІД ПОЛІНА — ДО КОРАБЛЯ. ЦЕНТР ТИСКУ МАНДРУЄ

Кусок поліна, що плаває плазом, з точки зору стійкості, або, як кажуть, остійності, цілком аналогічний до корабля. Нехай корабель (на рис. 16 схематично показано розріз) від качки або від вітру нахилився набік. Величина виштовхувальної сили при цьому не змінилася, бо наскільки об'єм зануреної частини збільшиться справа від осьової

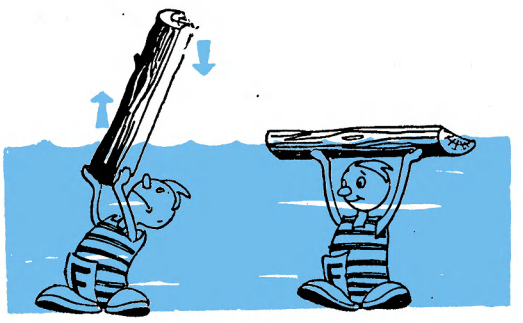


Рис. 14.

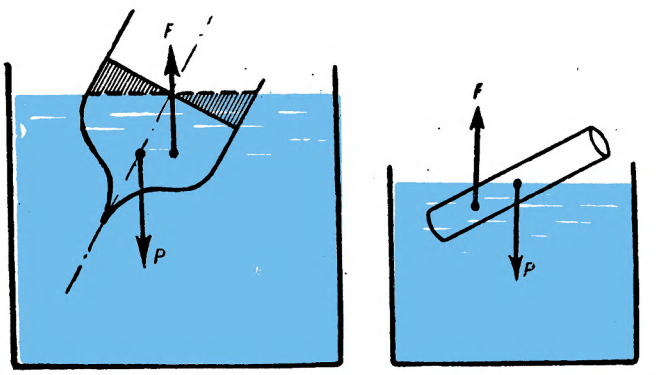


Рис. 16. Плаваюче поліно і судно мають стійкість.

лінії корабля, настільки він зменшиться зліва. Але оскільки праворуч витіснено більший об'єм рідини, то це означає, що центр ваги витісненого об'єму рідини теж перемістився вправо від осьової лінії. Інакше кажучи, центр тиску змістився вправо від осьової лінії. Виявляється, центр тиску мандрує! В цьому саме і вся справа. Тепер вага і виштовхувальна сила утворюють пару сил, яка повертає корабель в положення рівноваги.

ЧИ ЗАВЖДИ ІСНУЄ ВИШТОВХУВАЛЬНА СИЛА? ЗІТКНЕННЯ З ДНОМ

Покриємо дно скляної посудини тонким рівним шаром парафіну. Зверху покладемо кусок парафіну з дуже гладенькою основою. Якщо обережно налити в посудину води, кусок парафіну не випливе. У чому ж справа? Адже парафін легший від води. Невже порушено закон Архімеда?

Пригадаймо, чому виникає виштовхувальна сила. Якщо будь-який предмет з усіх боків оточений рідиною, то тиск рідини знизу завжди більший, ніж зверху. Це і є причиною виникнення виштовхувальної сили. В нашому досліді вода не проникає під лежачий на дні кусок парафіну, а тисне на нього тільки зверху.

Якщо ми будемо нахиляти посудину, то притиснутий водою парафін буде лише ковзати по дну.

Таким чином, рівнодійна всіх сил, які діють на цей кусок парафіну, напрямлена вертикально вниз. Тому що виштовхувальна сила змінила свій звичайний напрям на протилежний, то її умовно можна назвати негативною.

Тепер зрозуміло, чому підводний човен, що лежить на м'якому грунті, навіть випорожнивши свої баластні цистерни, не відразу підіймається вгору. Він може випливти тільки тоді, коли вода потрапляє під його корпус.

Цікаво відмітити, що коли площа зіткнення тіла, зануреного в рідину, з дном поступово зменшується, то існує такий момент, коли виштовхувальна сила дорівнюватиме нулю. Потім вона стає позитивною, і тіло випливає.

Треба запам'ятати, що виштовхувальна сила може бути не тільки позитивною, але й рівною нулю або негативною, тобто напрямленою вертикально вниз, коли тіло стикається з дном водоймища або посудини.

СТЕЖ ЗА СТРОГІСТЮ ДОВЕДЕНЬ. І НАДІЙНИЙ ДРУГ МОЖЕ ПІДВЕСТИ. МЕТАЦЕНТР

Ми знаємо, що при нахиленні корабля центр тиску зміщується від осьової лінії в той самий бік. А те, що утворюється пара сил, яка повертає корабель в положення рівноваги, ми показали тільки що на рисунку. За його допомогою наочніше й простіше можна уявити собі багато положень.

Однак і на Сонці бувають плями. І навіть такий надійний друг, як рисунок, може підвести, якщо його зробили невірно, або коли те, що ми на ньому зобразили, не є єдино можливим випадком. Коли корабель нахиляється, наприклад, вправо, то й центр тиску, природно, зміщується вправо. Але тут можливі два випадки (як показано на рис. 17), а ми поки що розглянули лише один.

Точка перетину вертикальної лінії, що проходить через центр тиску, з осьовою лінією корабля називається метацентром. Якщо він знаходиться вище від центра ваги судна, то утворюється пара сил, що повертає судно в положення рівноваги. Вантаження суден тому здійснюють так, щоб центр ваги судна був можливо нижче: важкі вантажі складають в нижню частину трюму, а легкі — у верхню частину трюму та на палубу.

Трюми вантажних суден, що йдуть порожняком, іноді спеціально навантажують баластом. Адже якщо метацентр при якому-небудь положенні корабля виявиться нижче центра ваги, то судно буде дедалі більше нахилятися, далі відходити від положення рівноваги і, нарешті, перекинеться (рис. 17, праворуч).

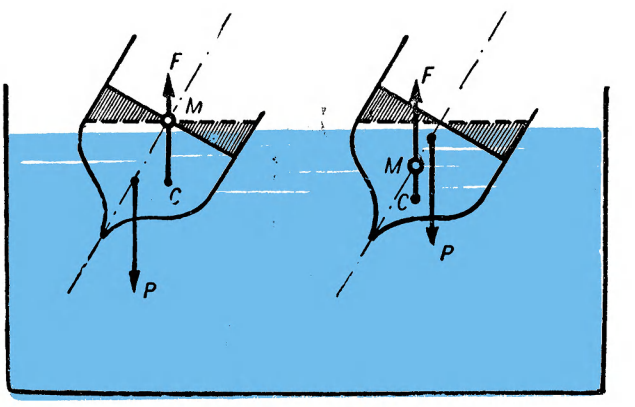
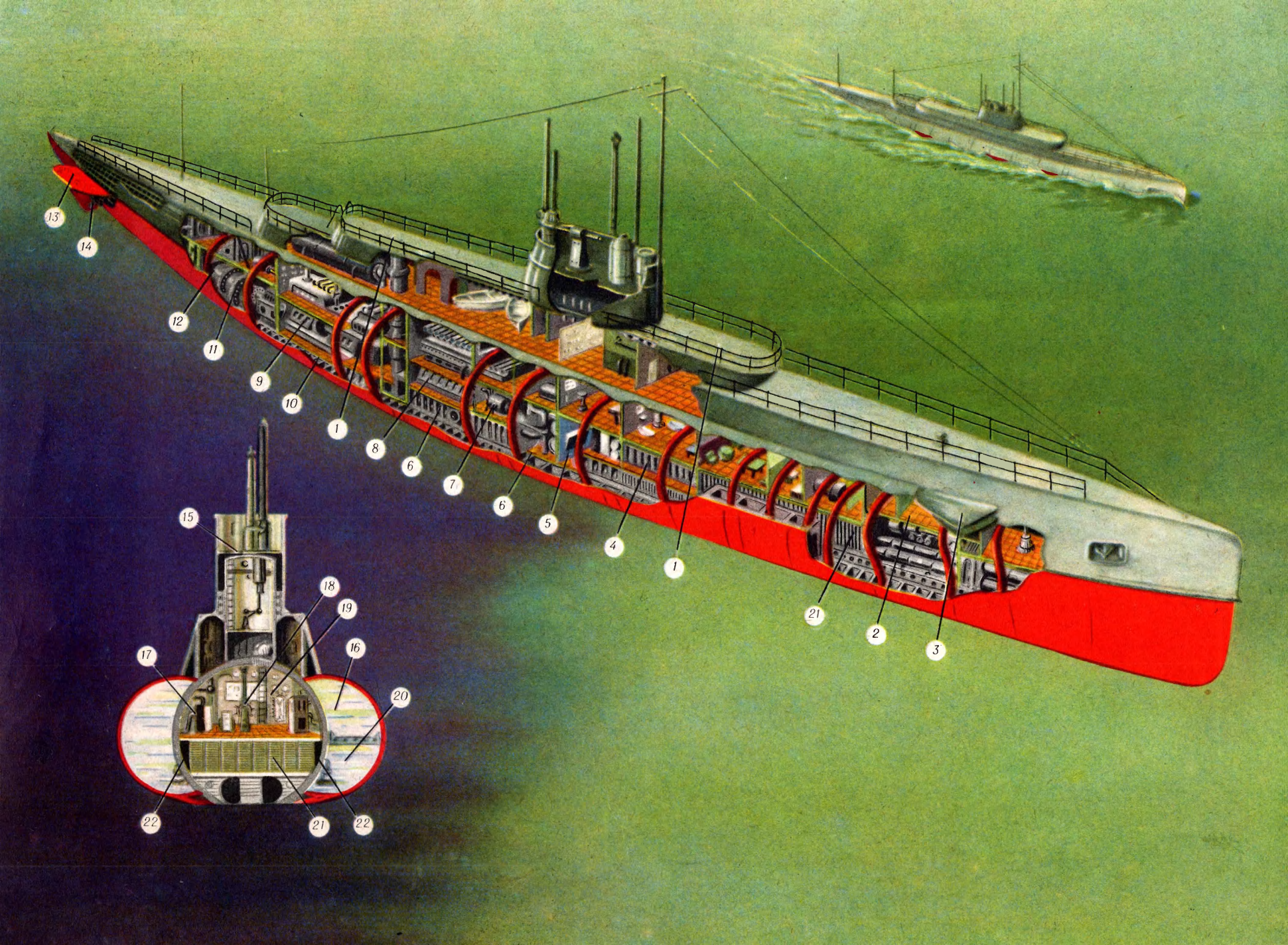


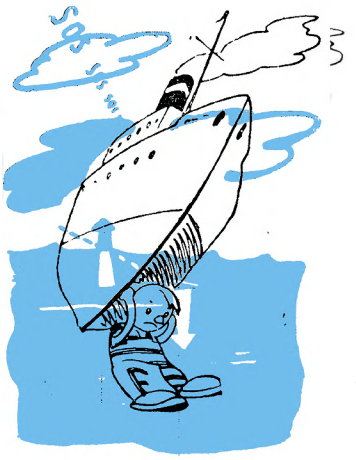
Рис. 17.

Таблиця 8. Люди з аквалангами знайшли судно, яке затонуло 2000 років тому.


13
14
12
11
9
10
1
8
6
7
6
5
4
1
21
2
3
15
18
19
17
16
20
22
21
22

ВТІШНА ВИНОГРАДИНА І ПІДІЙМАННЯ ЗАТОНУЛИХ СУДЕН. ДОРОГИ ЧЕРЕЗ РІКИ

Укинемо виноградину в склянку з лимонадом. Вона піде на дно. Але коли до неї прилипнуть пузирки вуглекислого газу, то виштовхувальна сила, діюча на виноградину й пузирки газу, стане більшою від їх сумарної ваги, і виноградина випливе на поверхню. Тут пузирки газу лопнуть, і виноградина знову піде на дно. Так буде повторюватися багато разів.



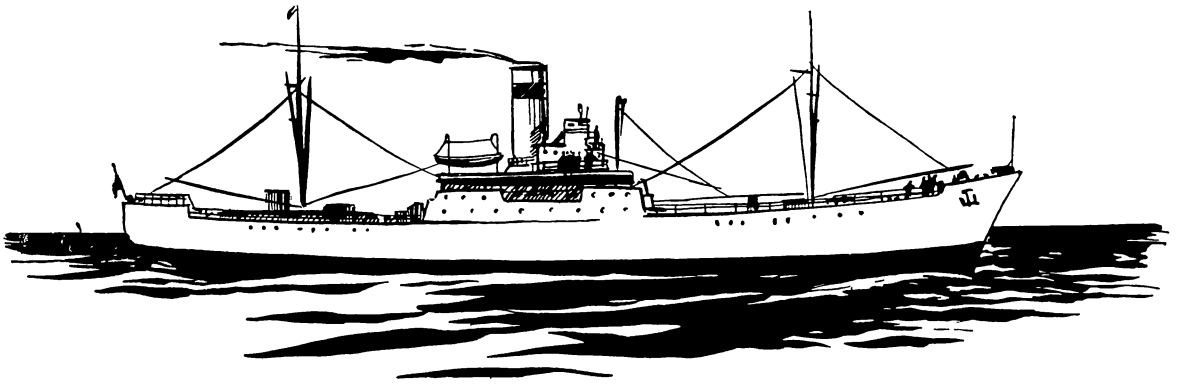
Підіймання затонулих суден грунтується на цьому ж принципі: великі залізні резервуари — понтони — наповнюють водою і топлять по обидва боки корабля. Потім водолази з'єднують їх широкими стальними стрічками, підведеними під корпус корабля. Стисненим повітрям з понтонів видаляють воду, і величезні поплавки підіймають судно.

Понтони часто використовують як плавучу опору при будуванні мостів — там, де ставити кам'яні бики складно й дорого. Так, ще в 1895 р. у Ризі був побудований понтонний міст через Даугаву, який діє й до сьогоднішнього дня. Перед льодоставом понтонні мости розводять, а понтони відводять у затони на зимівлю. Якщо понтонний міст прокладено через судноплавну ріку, то в ньому роблять розвідні ланки для пропуску суден.

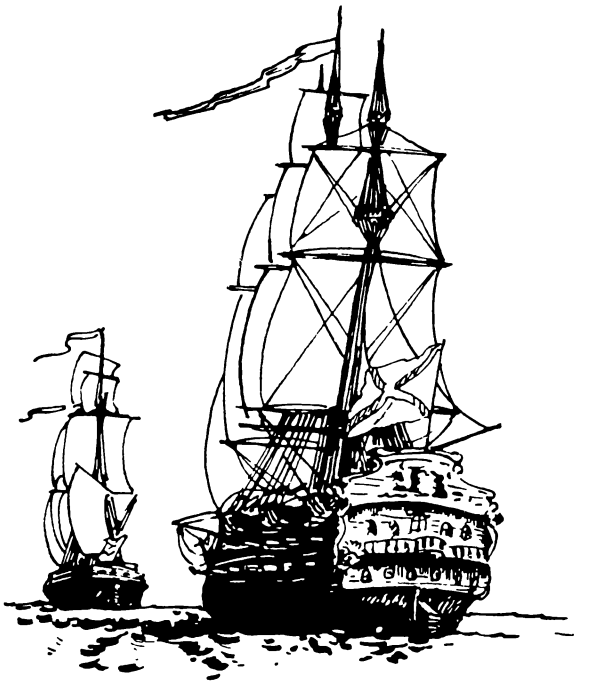
Велике значення понтонів і у військовій справі. Для збудування переправи кілька понтонів ставлять поруч впоперек ріки й скріплюють між собою. Поверх них укладають стальні або дерев'яні балки й настил. Ланцюжок понтонів тягнеться з одного берега на другий — і дорога через ріку готова. Такою дорогою можуть проїжджати танки, автомашини, артилерія, не кажучи вже про піхоту.

ВОДОТОННАЖНІСТЬ І СОЛОНІСТЬ МОРІВ

Викидаючи клуби́ диму і пихкаючи, маленький буксир тягне за собою цілий караван барж, кожна з яких більша від свого поводиря. Але для того щоб указати розміри судна, моряки звичайно говорять не про його лінійні розміри, а про водотоннажність. Якщо судно має водотоннажність 5 тис. тонн, це означає, що витіснена ним вода, коли воно занурене до норми, важить 5 тис. *Т*. Вага корабля з вантажем в такому разі також дорівнює 5 тис. *Т* — адже, коли тіло плаває,



Таблиця 9. Зовнішній вигляд і переріз підводного човна: *1*. Місце розміщення озброєння. *2*. Диферентна цистерна. *3*. Правий носовий горизонтальний руль. *4*. Акумулятори. *5*. Балони з стисненим повітрям. *6*. Цистерни з пальним. *7*. Динамомашини. *8*. Допоміжні дизелі. *9*. Зарядний погріб. *10*. Баластні і паливні цистерни між внутрішнім і зовнішнім корпусами. *11*. Головні електродвигуни. *12*. Електродвигуни економічного ходу (сповільненого). *13*. Кормовий правий горизонтальний руль. *14*. Правий гвинт. *15*. Вихідний побічний люк. *16*. Бортові цистерни головного баласту. *17*. Водовідливні труби. *18*. Штурвал вертикального руля. *19*. Трап до бойової рубки. *20*. Труби для осушення цистерн. *21*. Акумуляторна яма. *22*. Балони стисненого повітря.



Кораблі ескадри адмірала Ушакова.

його вага дорівнює вазі витісненої ним рідини. На обшивці судна можна зробити позначку, яка відповідає зануренню при повному навантаженні.

Але уявіть собі, що наш корабель перейшов з одного океану в інший, де вода солоніша. Водотоннажність, яка дорівнює вазі судна, при цьому, зрозуміло, не зміниться, але рівень занурення стане меншим. Тому на обшивці роблять не одну, а кілька позначок.

Тому що з поверхні водоймищ випаровується тільки прісна вода, то на півдні, де випаровування велике, а дощів випадає мало, солоність води може бути дуже велика. В Кара-Богаз-Голі — затоці Каспійського моря — людина не може потонути, бо питома вага води в затоці більша, ніж середня питома вага людини. Озеро Баскунчак і Мертве море мають ті самі властивості.

КАТАСТРОФА В САУТГЕМПТОНІ. АКАДЕМІК КРИЛОВ. КОРОТКО ПРО НАШ ФЛОТ

Англійський лінійний корабель «Роял Джордж», що стояв на рейді Саутгемптона, трохи нахилили, щоб почистити днище від черепашок і водоростей. Для цього гармати з одного борту відкотили до центра судна, а з другого — відсунули ближче до краю. Судно дістало невеликий і цілком безпечний крен. Але через недбалість забули закрити гарматні люки. Вода через них поступово просочилася в трюми, і корабель перекинувся. Загинуло 900 чоловік разом з адміралом, командуючим ескадрою.

Знаменитий кораблебудівник академік Олексій Миколайович Крилов, послідовник ученого й флотоводця адмірала С. О. Макарова, багато років працював над проблемами остійності й непотоплюваності корабля. Він часто наводив як приклад цю катастрофу для підтвердження тієї думки, що запас плавучості судна вимірюється об'ємом його надводної частини. Справді, нехай навіть борти корабля високо підняті над поверхнею води, але якщо в них є які-небудь незакриті отвори, запас його плавучості різко знижується. О. М. Крилов зауважував, що іноді навіть треба штучно зменшити запас плавучості. Відомо, що корабель поділено на водонепроникні відсіки. Потрапивши до пошкодженого відсіку, вода може надати кораблеві небезпечний крен.

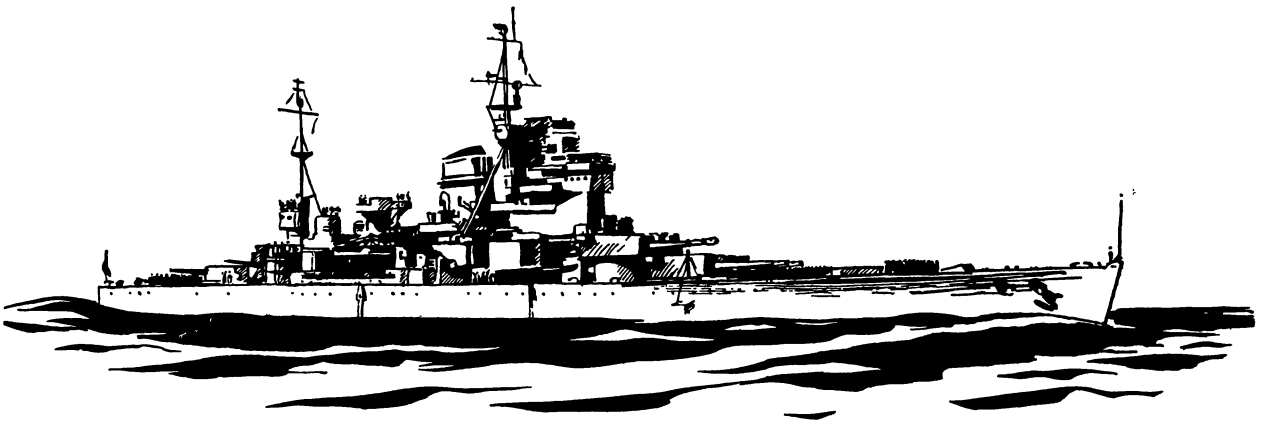
Ще в 1904 р. О. М. Крилов розробив для визначення типів військових кораблів таблиці непотоплюваності. В них він, зокрема, вказав, як, пожертвувавши деяким запасом плавучості, за допомогою занурення підводних відсіків другого борту можна зберегти пошкоджений корабель на плаву. Але пропозицію вченого царське адміралтейство поклало під сукно.

Інженер броненосця «Орел» В. П. Костенко, обізнаний з таблицями Крилова, з власної ініціативи збудував на кораблі систему вирівнювання. І під час Цусімського бою, незважаючи на важкі пошкодження, цей корабель лишався на плаву, а броненосці «Олександр III», «Бородіно», «Суворов», що дістали такі самі пошкодження, перекинулись і потонули.

У нашій країні за роки Радянської влади створено сильний Військово-Морський Флот, в будівництві якого активну участь брав О. М. Крилов. Наші торговельні судна борознять всі океани світу, а на півночі СРСР працює найпотужніший криголамний флот.

У 1959 р. в СРСР вступив до ладу перший у світі атомний криголам «Ленін», що став флагманом Полярного Флоту. Атомні двигуни, 134 *м* довжини, 16 тис. *Т* водотоннажності, оригінальна конструкція роблять його одним з найкращих суден нашого часу.

Енергетичне серце корабля — три потужні атомні реактори. Їм потрібно на добу



Військовий корабель.

лише кілька десятків грамів ядерного палива. Безперервним ходом криголам зможе просуватися в кризі двометрової товщини.

Атомний криголам продовжить навігацію Північним морським шляхом майже вдвоє.

У конструкції атомоходу знайшла відбиток розроблена акад. О. М. Криловим теорія непотоплюваності. Одинадцять водонепроникних переборок збережуть корабель на плаву навіть у тому випадку, якщо будуть затоплені два головних відсіки.

Чи справді криголам коле лід? Ні, це уявлення невірне. Корпусу криголама надається така форма, щоб ніс його з розгону в'їжджав на лід. Виштовхувальна сила зменшується, і не компенсована нею частина ваги корабля ламає, продавлює лід.

ПАСТКА ДЛЯ ВІТРУ

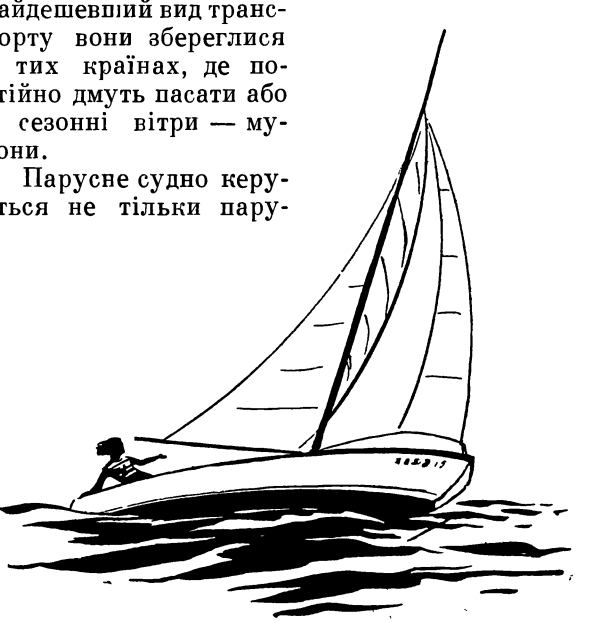
Ми розповіли про те, як поводять себе рідини в стані спокою, розповіли про закони гідростатики. Але чи часто рідина буває зовсім не рухома? Не замислюючись, можна сказати, що дуже рідко.

Наука про рухому рідину називається г і д р о д и н а м і к о ю. Закони цієї науки складніші, в школі їх вивчають зовсім мало. Тому про них ми не говоритимемо.

Наведемо кілька прикладів, які допоможуть з'ясувати деякі явища, що з ними ви зустрічаєтесь у повсякденному житті.

Всім відомий фантаст і брехун барон Мюнхаузен любив розповідати, як одного разу під час його мандрівок по Росії величезний вовк накинувся на коня, запряженого в його сани. Потворний звір з'їв задню половину коня, і, коли передня частина коня випала з упряжки, вовк опинився запряженим у сани. На такій незвичайній упряжці барон навскач влетів у Петербург. Неправдоподібність цього оповідання викликає усмішку.

Але людський розум зумів спіймати й запрягти в свої екіпажі могутню й грізну стихію — вітер. Пасткою для нього послужив шматок полотна — парус. Завдяки парусу стрімко прямує по воді легка й гарна спортивна яхта. А трохи більше століття тому під парусами ходили лінійні кораблі, що несли на собі 120 гармат. У XX ст. парусні судна використовуються в основному для спортивних, учбових та промислових цілей. Як найдешевший вид транспорту вони збереглися в тих країнах, де постійно дмуть пасати або є сезонні вітри — мусони.



Парусне судно керується не тільки пару-

Рис. 18. Лавірування парусного судна.

сами, але й стерном. Воно може рухатися проти вітру, використовуючи в той же час його силу. Але в такому разі йому доводиться переміщатися тільки ламаною лінією змінними галсами. Такий спосіб руху називається лавіруванням. Якщо при такому русі вітер дме з правого боку, то кажуть, що судно йде правим галсом, а якщо з лівого боку — то лівим галсом. На рис. 18 показано лавірування парусного судна під час руху проти вітру.

ГІДРОСТАТИКА — ЦЕ ТІЛЬКИ ОДНА ВУЛИЦЯ «ВЕЛИКОГО МІСТА» ФІЗИКИ

Уявіть собі, що ви переїхали жити в якенебудь велике місто й хочете його вивчити. Спочатку ви освоїтесь в своєму районі, запам'ятаєте дороги до школи, до кіно, до найближчих магазинів, підете в театр чи на стадіон, поїдете до знайомих. Так поступово ви будете пізнавати інші райони міста та окремі вулиці, які раніше здавались вам цілком чужими та різними. І, нарешті, місто стане перед вами як єдине ціле.

Таке ознайомлення з містом подібне до вивчення будь-якої науки, наприклад фізики. У цій статті ви ознайомились в основному тільки з однією вулицею великого міста фізики — з гідростатикою, але ця вулиця дуже подібна до другої вулиці — аеростатики, науки про гази, що перебувають у спокої.

Так само як правила вуличного руху справедливі для всіх вулиць, так для наук гідростатики та аеростатики справедливі ті самі закони Архімеда і Паскаля.

Аеростат, викинувши баласт, починає підійматися вгору так само, як підводний човен після випорожнення своїх баластних цистерн. Якщо ж рідина чи газ рухаються, то й тут між ними є багато спільного: судно, що рухається, і літак, який летить, обоє відчувають опір, викликаний навколишнім середовищем. Двигун судна, так само як і мотор літака, некорисно витрачає частину виконаної роботи на створення хвиль. Нарешті, рідина може перетворюватися в пару — газ, а пара — в рідину.

Прочитавши кілька статей цього тома, ви в думці зробите мандрівку багатьма вулицями великого міста фізики і у вас почнуть вимальовуватися його грандіозні обриси.

ЛІТАЛЬНІ МАШИНИ

Літаки, планери, вертольоти, конвертоплани та інші літальні машини служать для перевозок пасажирів і вантажів, для наукових досліджень, а також для воєнних цілей. Деякі літаки літають швидше урагану, швидше звуку, швидше куль і артилерійських снарядів. (Швидкість урагану іноді досягає 200 *км/год*; швидкість звуку — 1200 *км/год*; швидкість бронебійного снаряда — близько 2000 *км/год*; найбільша швидкість літака перевищила 3000 *км/год*).

ФІЗИКА ПОЛЬОТУ

Дія літальних машин грунтується на законах науки про рух газів.

Рух повітря. Закони руху газів вивчають або при вільному польоті моделей, або при русі повітря по так званих аеродинамічних трубах (рис. 1 і кольорова табл. на стор. 304). Перша в світі аеродинамічна труба була збудована винахідником ракетного двигуна К. Е. Ціолковським у 1897 р. На цю трубу пішло зовсім небагато тесу та кілька листів дахового заліза. Сучасні аеродинамічні труби являють собою складні й дорогі споруди, які обслуговує багато вчених, інженерів і робітників.

У трубах переривної дії повітря подається з батареї газгольдерів, куди його нагнітають потужні компресори (кол. табл. на стор. 304). У трубах безперервної дії повітря подається компресором, який приводиться в дію електромотором (див. рис. 1).

Потужність силових установок сучасних надзвукових аеродинамічних труб досягає десятків і сотень тисяч кінських сил.

Розглянемо течію повітря трубою переривної дії (верхній рисунок на кол. табл. на стор. 304). У великих балонах — газгольдерах — стиснуте повітря майже нерухоме. На нашому рисунку стиснуте повітря зображене голубим кольором. Під час роботи труби повітря із газгольдерів широкими й міцними трубопроводами надходить у повітроприймач, або ресивер. Манометри, встановлені на ресивері, показують майже такий самий тиск, як і в газгольдерах. Швидкість повітря все ще мала. Для вимірювання швидкості застосовуються особливі прилади — махметри. У міру віддалення від ресивера труба звужується, швидкість потоку, як швидкість гірської річки, що протікає через ущелину, збільшується. Пам'ятаєте, як сказано у Лермонтова:

Терек виє в злобі хмурій,
Між бескетів кам'яних,
Плач його — мов голос бурі,
Ринуть бризки сліз дрібних.
Та міняється лукаво
У степах він мимохіть ...

Переклад *М. Рильського*
[М. Ю. Лермонтов. Вибрані твори. Держ. вид. художньої літератури, Київ, 1951, стор. 73.]

При наближенні до вузького перерізу швидкість збільшується, тому що через нього проходить за секунду стільки ж повітря, скільки й через широкий переріз.

По інерції всі тіла рухаються прямолінійно й рівномірно. З якої ж причини зростає швидкість течії? Відповідь на це питання дають манометри, які показують, що у вузькому перерізі труби тиск менший, ніж був у широкому. Під дією різниці тисків виникає сила, напрямлена від широкої ділянки до вузької, яка й примушує повітря рухатися прискорено. При бігу води або будь-якої іншої рідини має місце закон, названий ім'ям ученого, який його відкрив,— закон Бернуллі: *При збільшенні швидкості потоку тиск спадає, а при зменшенні швидкості потоку тиск зростає.* Статичний тиск, який є в потоці, вимірюють манометричною трубкою, отвір якої паралельний до потоку (рис. 2). Якщо направити отвір трубки назустріч потоку, рідина, що потрапляє в трубку, загальмується, тиск зросте і манометр показуватиме повний тиск.

Коли повітря (або будь-який інший газ) рухається з малою швидкістю — меншою від 100 *м/сек*, зміни тиску бувають невеликі і густину можна вважати сталою. В такому разі закони руху газу будуть такими самими,

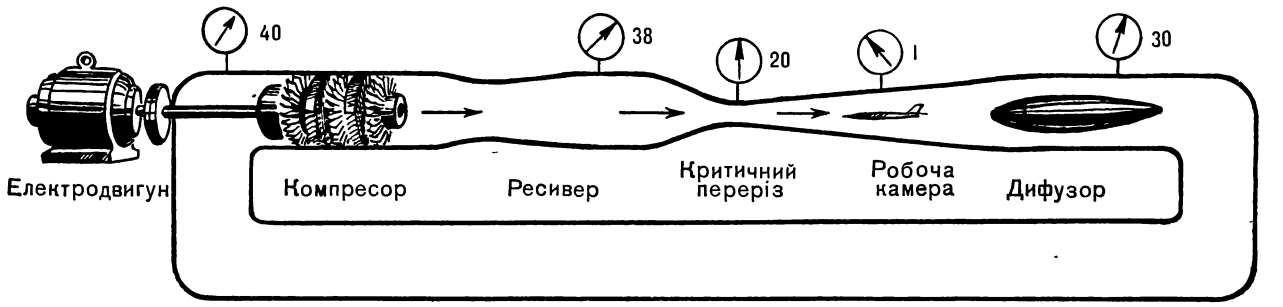


Рис. 1. Схема надзвукової аеродинамічної труби безперервної дії.

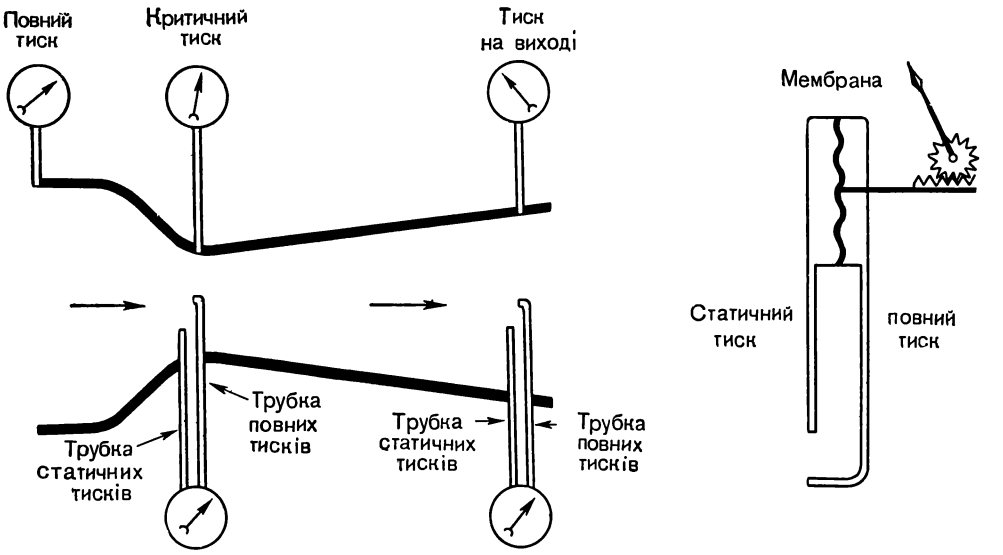


Рис. 2: а) вимірювання повного і статичного тиску, б) будова махметра, або спідометра.

як закони руху рідини. Тому закон Бернуллі має велике значення для авіації. Але, на відміну від рідин, гази можуть стискуватися й розширюватися.

При зниженні тиску повітря розширюється, а його густина зменшується. Зміни густини помітні під час великих змін швидкості.

На кольоровій таблиці (стор. 304) зменшення густини показане зміною інтенсивності голубого кольору.

Ясно, що для протікання розрідженого газу потрібний ширший прохідний переріз, ніж для стиснутого. І ось при зменшенні тиску потоку газу вступають у боротьбу дві обставини: збільшення швидкості і зменшення густини газу. При малих зниженнях тиску переважає зростання швидкості, тому, щоб тиск повітря спадав, а швидкість збільшувалась, переріз труби повинен зменшуватись. У найвужчому, «критичному», перерізі труби швидкість течії дорівнює місцевій швидкості поширення звуку, а тиск знижується, як показують манометри, майже вдвічі. При дальшому зниженні тиску швидкість повітря й далі зростатиме і стане більшою від швидкості звуку, але густина повітря зменшиться настільки, що, для того щоб пропустити весь потік, трубу треба зробити такою, яка розширюється (рис. 1 і кол. табл. на стор. 304).

Таким чином, прискорення дозвукового потоку повітря (так само як і прискорення дозвукового потоку рідини) відбувається в трубі, яка звужується. Прискорення надзвукового потоку повітря відбувається в трубі, що розширюється, якщо тиск на виході з труби менший, ніж у найвужчому перерізі; бо інакше рух повітря не прискорився б, а знову сповільнювався, і надзвукового потоку не вийшло б.

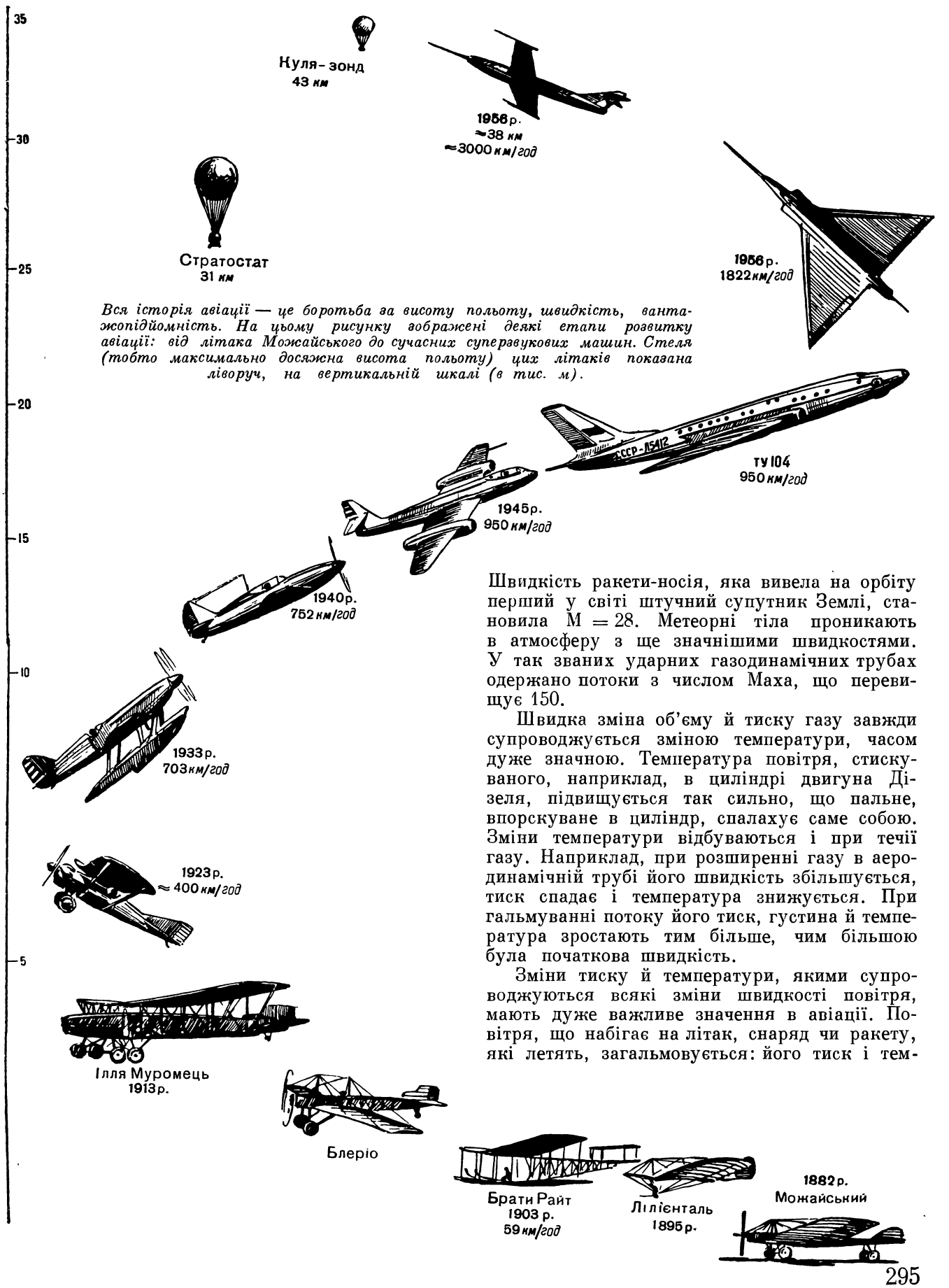
Розділ механіки, який вивчає рух повітря з дозвуковими швидкостями, називається аеродинамікою. Рух газів з надзвуковими швидкостями вивчається газодинамікою.

Для того щоб зразу було ясно, чи слід враховувати стисливість повітря, швидкість зручно вимірювати так званими числами Маха, названими іменем одного з основоположників газодинаміки. Число Маха — М дорівнює відношенню швидкості руху w до швидкості звуку c:

$$M = \frac{w}{c}.$$

Стисливість стає помітною при наближенні М до одиниці.

Радянський реактивний пасажирський літак ТУ-104 літає з швидкістю, вираженою числом М = 0,8; реактивні винищувачі 1958 р. літають при М = 2,5. Останній з опублікованих рекордів швидкості, встановлений на пілотованому ракетному літаку, становить М = 3,2; проектуються літаки на М = 10.



Вся історія авіації — це боротьба за висоту польоту, швидкість, вантажопідйомність. На цьому рисунку зображені деякі етапи розвитку авіації: від літака Можайського до сучасних супервзвукових машин. Стеля (тобто максимально досяжна висота польоту) цих літаків показана ліворуч, на вертикальній шкалі (в тис. м).

Швидкість ракети-носія, яка вивела на орбіту перший у світі штучний супутник Землі, становила M = 28. Метеорні тіла проникають в атмосферу з ще значнішими швидкостями. У так званих ударних газодинамічних трубах одержано потоки з числом Маха, що перевищує 150.

Швидка зміна об'єму й тиску газу завжди супроводжується зміною температури, часом дуже значною. Температура повітря, стискуваного, наприклад, в циліндрі двигуна Дізеля, підвищується так сильно, що пальне, впорскуване в циліндр, спалахує саме собою. Зміни температури відбуваються і при течії газу. Наприклад, при розширенні газу в аеродинамічній трубі його швидкість збільшується, тиск спадає і температура знижується. При гальмуванні потоку його тиск, густина й температура зростають тим більше, чим більшою була початкова швидкість.

Зміни тиску й температури, якими супроводжуються всякі зміни швидкості повітря, мають дуже важливе значення в авіації. Повітря, що набігає на літак, снаряд чи ракету, які летять, загальмовується: його тиск і тем-

пература зростають. Різниці тиску, що при цьому виникли, створюють підіймальну силу крил та силу опору польоту. При надзвуковому польоті підвищення температури та тиск бувають дуже значними. Так, при M=3, навіть якщо політ відбувається в стратосфері, де температура дорівнює —56°,5, температура загальмованого потоку, що прилягає до поверхні літака, досягає +333° і, якщо не вжити особливих заходів для охолодження, льотчик почуватиме себе так, ніби його кабіну помістили в духовку, де підрум'янюється печеня.

При M = 6 температура загальмованого повітря стає вищою, ніж всередині сталеплавильної печі. При проникненні в атмосферу метеорного тіла, швидкість якого перевищує 11 *км/сек*, температура стискуваного повітря вища від точки плавлення будь-якої з відомих твердих речовин.

Різке збільшення температури при гальмуванні надзвукового потоку називають тепловим бар'єром. Тепловий бар'єр обмежує зростання швидкості літаків при польоті в атмосфері. Тому штучні супутники Землі і балістичні ракети далекої дії можуть літати тільки в надзвичайно розріджених шарах атмосфери або за її межами.

Відносні підвищення температури, тиску й густини повітря під час гальмування при різних початкових числах Маха становлять:

M	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$T_{гальм}/T$	1,05	1,2	1,8	2,8	4,2	6,0
$p_{гальм}/p$	1,19	1,89	7,8	37	150	528
$\gamma_{гальм}/\gamma$	1,13	1,575	4,34	13,3	36	88

Аеродинамічні сили. На літаки, ракети, снаряди та інші тіла, які рухаються

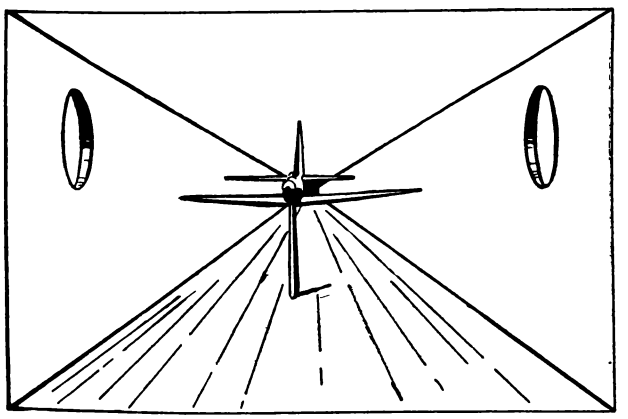


Рис. 3. Аеродинамічні терези в робочій камері труби.

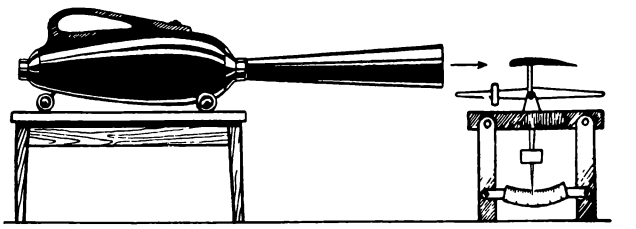


Рис. 4. Модель аеродинамічної труби і терезів.

в повітрі, діють так звані аеродинамічні сили. Щоразу, коли ми гуляємо у вітряну погоду або висуваємося на ходу з вікна вагона, ми на собі відчуваємо дію аеродинамічних сил. Сила, з якою повітря, діючи на крила літака, удержує його в польоті; сила, з якою ураган розхитує та вириває дерева; сила, яка поступово загальмовує штучні супутники Землі, виведені на орбіту,— всі ці сили є аеродинамічними.

Аеродинамічні сили не залежать від того, що́ в дійсності рухається: повітря чи літак. Важлива лише їх відносна швидкість. Аеродинамічні сили вивчають на досліді. Французький інженер Ейфель (1831—1923), будівник знаменитої 315-метрової башти, спостерігав взаємодію тіл з повітрям, скидаючи моделі з її верхніх поверхів.

Видатний російський учений М. Є. Жуковський вперше зробив досліди в аеродинамічній трубі, збудованій ним в Московському вищому технічному училищі (МВТУ).

Відносні швидкості повітряного потоку в дослідах Ейфеля, Жуковського і Ціолковського, який почав свої дослідження на кілька років раніше, не перевищували десятків метрів на секунду, тобто були далеко менші від швидкості звуку. Однак уже в ті далекі роки, спостерігаючи за польотом снарядів, вчені-артилеристи вивчали аеродинамічні сили при надзвукових швидкостях. Тепер взаємодію повітря з рухомими тілами вивчають і при вільному польоті моделей, і в аеродинамічних трубах.

Дослідження в трубах називають продувками. Досліджувану модель крила, літака, ракети чи іншої літальної машини поміщають в трубу, з'єднавши її важелями й тягами з аеродинамічними терезами, що дають можливість вимірювати не тільки величину, але й напрям діючих сил (рис. 3). Сучасні аеродинамічні терези являють собою складний і чутливий прилад.

Кожний шкільний фізичний гурток може виготовити модель аеродинамічної труби із

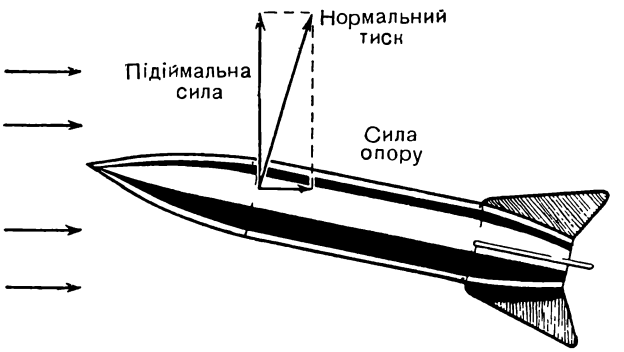


Рис. 5. Аеродинамічна сила звичайно напрямлена під кутом до напряму руху.

спрощеними терезами, використавши звичайний пилосос та деталі від дитячого «Конструктора» (рис. 4). Мішечок для збирання пилу можна вийняти, а на виході з пилососа для розширення «робочого простору» труби вставити конус, склеєний з щільного креслярського паперу.

Терези повинні складатися із стояка з рухомим коромислом, до якого прикріплені покажчик та стержні для установки моделей, що їх випробовують. Для вимірювання сили на коромисло треба надіти дротяні вантажики — рейтери.

Продувані моделі — крила, літаки, ракети та ін.— найпростіше виліпити з пластиліну. Добре, якщо у вас вистачить терпіння покрити поверхню моделей рівним шаром фольги. Для вивчення залежності швидкості течії від тиску скористуємося U-подібними скляними манометричними трубками, наповненими підфарбованою водою. Наконечники для відбору повного і статичного тиску також можна виготовити із скляних трубок. Виліпимо різні моделі для продувок: кулі, круглі пластинки, порожнисті півкулі, конуси, видовжені краплеподібні тіла діаметрами 1, 2 і 3 *см*. Будемо по черзі встановлювати моделі на терезах, кожного разу так урівноважуючи їх противагою, щоб терези були в байдужій рівновазі. Подамо повітря: появиться аеродинамічна сила, і рівновага терезів порушиться. Щоб повернути покажчик у вихідне положення, надінемо на коромисло рейтер і будемо пересовувати його, поки рівновага не встановиться. Аеродинамічну силу, що діє на модель, знайдемо за законом моментів сил:

$$f = Cm \frac{l_1}{l_2},$$

де Cm — вага рейтера, l_1 і l_2 — плечі сил.

Досліди із справжніми аеродинамічними терезами показали, що аеродинамічна сила, взагалі кажучи, напрямлена під кутом до напряму руху (рис. 5). За правилом паралелограма її можна розкласти на силу бічного тиску, напрямлену під прямим кутом до потоку, і на силу опору, напрямлену в бік, протилежний руху. Якщо бічна сила напрямлена вгору, її називають підіймальною силою.

Сила опору при русі тіл у повітрі виникає завжди, у всіх випадках. Бічна сила виникає в тих випадках, коли обдуване тіло має несиметричну форму або коли воно розміщене під кутом до потоку. Наші терези дають можливість виміряти силу опору і підіймальну силу по черзі.

Згідно з обчисленням Ньютона, підтвердженим численними дослідами, аеродинамічні сили пропорціональні добутку квадрата відносної швидкості на густину повітря і на поперечний (міделевий) переріз обдуваного тіла. Що називають міделевим перерізом, ясно з рис. 6. Поперечні перерізи виготовлених нами моделей відносяться, як 1 : 4 : 9.

За допомогою наших терезів ми знайдемо, що і сили опору, яких зазнають моделі однакової форми, але різних розмірів, перебувають у такому самому співвідношенні. Наша аеродинамічна труба не дає можливості дослідити залежність аеродинамічних сил від відносної швидкості і від густини повітря. Деякі справжні труби мають міцні непроникні оболонки, які дають змогу проводити дослідження при підвищеному або при зниженому тиску.

Істотний вплив на аеродинамічні сили виявляє форма обдуваного тіла. Найбільшого

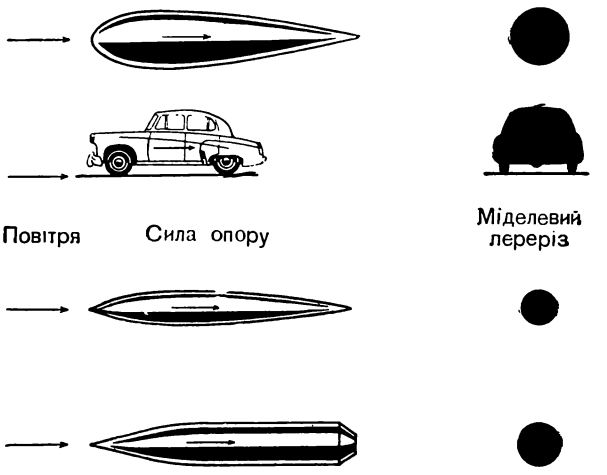


Рис. 6. Легкообтічні форми при рівних швидкостях. Праворуч показано міделеві перерізи.

опору зазнає порожниста півкуля, повернута відкритою стороною назустріч потоку. Трохи меншого опору зазнає кругла пластинка. Найменшого опору (при дозвукових швидкостях) зазнають видовжені тіла з закругленим носом, загостреною кормою і гладенькою поверхнею (рис. 6). Таку легкообтічну форму мають фюзеляжі дозвукових літаків і кузови перегонових автомобілів. Важко повірити, поки не переконаєшся на досліді, що легкообтічне тіло діаметром понад 4 *см* і кругла пластинка діаметром 1 *см* зазнають однакового опору. Відзначимо, що форма, при якій опір буває найменшим, залежить від швидкості обтікаючого потоку. Так, при надзвукових швидкостях найбільш обтічними виявляються тіла з гострим носком, циліндричною бічною поверхнею і трохи зрізаною кормою (рис. 6). Тому природно, що такої форми надають снарядам і ракетам.

Шляхом дослідів в аеродинамічних трубах удалося знайти причини виникнення аеродинамічних сил. Цими причинами є тертя, завихрення та хвилеутворення.

Сили тертя виникають внаслідок співударів молекул обтікаючого повітря з молекулами обдуваного тіла. Ударившись об поверхню тіла, молекула повітря втрачає швидкість. Шар газу, прилеглого до обдуваного тіла, загальмовується. В міру віддаляння від поверхні швидкість повітря зростає, наближаючись до швидкості незбуреного потоку. Ділянка потоку поблизу поверхні тіла або стінок, на яку поширюється збурююча дія сил в'язкості, називається межовим шаром. При обтіканні виступів або ребер межовий шар відривається від поверхні і утворює вихори (рис. 7). Водяні вихори, що виникають при веслуванні позаду весла, виразно видно неозброєним оком. Такі повітряні вихори можна спостерігати й фотографувати, домішавши до потоку, наприклад, алюмінієвий порошок.

При надзвукових швидкостях, крім сил тертя й вихорів у повітрі, виникають ще й ударні хвилі, які віддалено нагадують ті, що розходяться по поверхні води від носа моторного човна. Ударні хвилі в надзвукових трубах удається фотографувати.

При дозвукових швидкостях хвиль не виникає: набігаюче повітря загальмовується поступово, його тиск також поступово зростає. Імпульс тиску, надаваний тілом набігаючому повітрю, поширюється з швидкістю звуку. Якщо швидкість руху дозвукова, набігаючі маси повітря встигають заздалегідь дістати

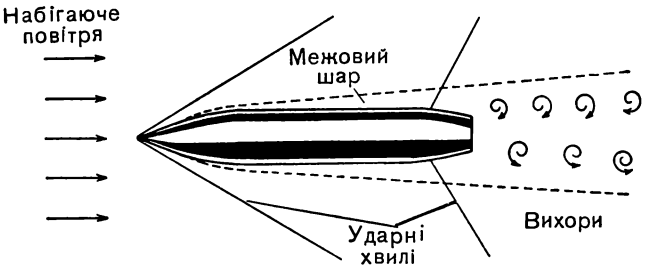


Рис. 7. Під час руху в надзвуковою швидкістю виникають вихори та ударні хвилі.

«звістку» про наближення тіла, швидкість починає змінюватися за величиною й за напрямом, і повітря плавно обтікає тіло. Якщо ж швидкість руху надзвукова ($M > 1$), імпульс тиску, що поширюється з швидкістю звуку, не встигає дійти до набігаючих мас повітря і змінити їх швидкість. Тому, зустрівшись з поверхнею тіла, повітря загальмовується раптово, на відстані, яку проходять молекули газу від одного зіткнення до другого. Тиск, температура й густина повітря так само раптово збільшуються: виникає ударна хвиля. Підвищення температури та тиску повітря в ударній хвилі тим більше, чим більше спадання швидкості. Чим більше число Маха і чим гостріший носок снаряда, тим менший кут нахилу хвилі. Підвищений тиск, що утворюється за хвилею, діє на лобову поверхню тіла, створюючи так званий хвильовий опір.

Тупокінцеві тіла або круглі ядра створюють потужніші ударні хвилі і зазнають більшого хвильового опору, ніж гострокінцеві снаряди або ракети.

Енергія, затрачувана двигуном літальної машини на подолання сили опору, витрачається на тертя, на утворення вихорів і хвиль. З часом вихори та хвилі розсіюються, але їх енергія не зникає: вона витрачається на нагрівання потоку.

При вільному падінні в повітрі швидкість зростає до того часу, поки сила опору не дорівнюватиме вазі. Дальше падіння відбувається по інерції з сталою швидкістю. Чим більше «поперечне навантаження», вимірюване відношенням ваги падаючого предмета до міделевого перерізу, тим більша швидкість, при якій сила опору зрівнюється з силою ваги. Дрібні порошинки падають з швидкістю часток міліметра на секунду; дощові краплі — до 8 *м/сек*; парашутисти знижуються з швид-

кістю близько 5 *м/сек* (з такою самою швидкістю приземляється людина, яка стрибнула з висоти близько півтора метра). При затяжному стрибку, коли парашутист деякий час падає, не розкриваючи парашута, він знижується з швидкістю близько 60 *м/сек*; важкі авіабомби падають у нижніх шарах атмосфери з надзвуковою швидкістю.

Силу аеродинамічного опору можна виразити алгебраїчною формулою. Сила опору f прямо пропорціональна добутку міделевого перерізу S в *кв. м* на густину повітря ρ в технічних одиницях маси на *куб. м* і на квадрат швидкості w в *м/сек*:

$$f = c_x S \rho \frac{w^2}{2}.$$

Множник c_x, що називається коефіцієнтом опору, залежить від форми тіла та від його швидкості. При дозвукових швидкостях польоту ($M \ll 1$) c_x можна вважати сталим.

Коефіцієнт опору c_x при дозвукових швидкостях $M \ll 1$

Порожниста півкуля, відкрита назустріч потоку	1,3
Кругла пластинка під прямим кутом до потоку	1,1
Куля	0 4
Снаряд	0,15
Легкообтічне тіло	0,05

При наближенні швидкості до звукової величини c_x починає зростати, переходить через найбільше значення при $M = 1{,}2$ і знову спадає. Коефіцієнти опору були виміряні під час випробувальних польотів та при продувках в аеродинамічних трубах.

Залежність коефіцієнта опору ракети від числа Маха

M	0,5	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
c_x	0,15	0,28	0,30	0,42	0,34	0,24	0,20	0,17	0,15	0,13

Збільшення коефіцієнта опору поблизу швидкості звуку називають **звуковим бар'єром**. Для подолання звукового бар'єра служать реактивні двигуни, здатні розвивати велику силу тяги при малій власній вазі.

Крило. Літаки, планери та птахи удержуються в польоті аеродинамічною підіймальною силою, з якою рухоме повітря діє на крило. Діючу на крило аеродинамічну силу можна розкласти на **підіймальну силу** і на **силу опору**. Крім густини повітря та квадрата відносної швидкості, ці сили залежать від площі крила та кута атаки (рис. 8). Кутом атаки називається кут між хордою крила і напрямом потоку ε.

Крило зовсім не є площиною; його поперечний переріз, або, як кажуть інженери, «профіль», має досить складні обриси, вибрані залежно від розрахункової швидкості польоту. Профіль дозвукового крила був математично розрахований М. Є. Жуковським на підставі розвинутої ним теорії походження підіймальної сили. З повною підставою можна сказати, що сотні тисяч побудованих до останнього часу дозвукових літаків літали й літають на крилах Жуковського. Аеродинамічні інститути, такі, як ЦАГІ в Радянському Союзі, NASA в США та інші, розробляють найзручніші форми крил для білязвукових і для надзвукових літаків і дають рекомендації авіаційним заводам. Дозвукове крило при розглядуванні знизу має прямокутну, трапецієвидну або еліптичну форму (рис. 9). Білязвукові і надзвукові крила роблять стріловидними, дельтовидними або трикутними, бо при такій формі вони збуджують не дуже сильні ударні хвилі. При великих надзвукових швидкостях можна застосувати крила W-подібної, M-подібної і прямокутної форми.

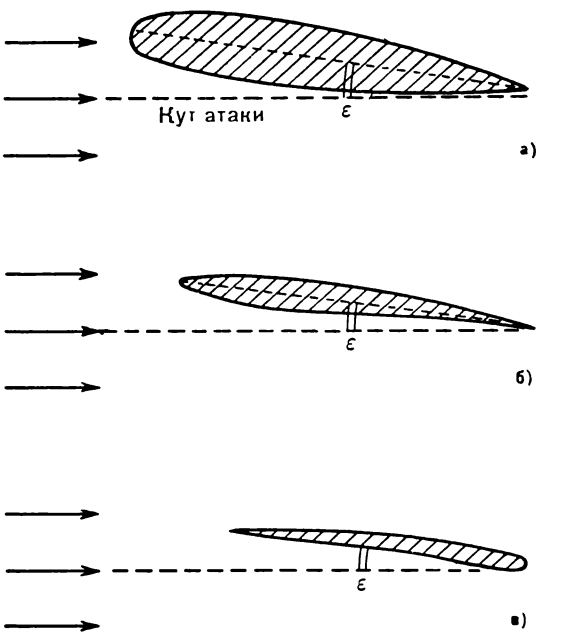


Рис. 8. Поперечні перерізи — профілі крил: а) дозвуковий, б) білязвуковий, в) надзвуковий.

За допомогою нашої труби та терезів ми можемо вивчити залежність підіймальної сили від площі та від кута атаки, виготовивши з пластиліну моделі прямокутного дозвукового крила розмірами 2×2 і 3×3 *см*. Встановимо модель на кінці коромисла терезів та зрів-

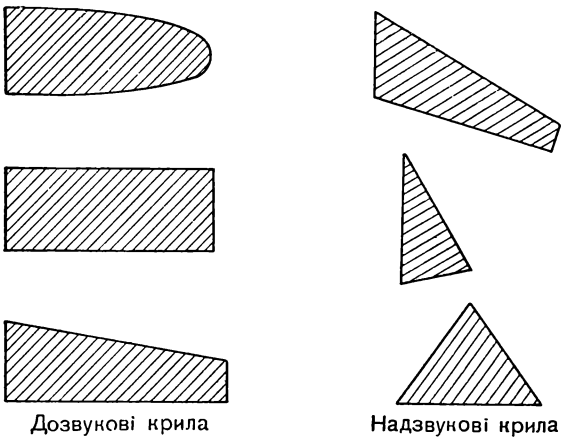


Рис. 9. Дозвукові і надзвукові крила в плані.

новажимо противагою. Включимо подачу повітря і, пересуваючи вантажик, визначимо підіймальну силу: при рівних кутах атаки підіймальні сили наших моделей будуть відноситися, як їх площі, тобто як 9 : 4.

Дозвукове крило відчуває підіймальну силу навіть при невеликих від'ємних кутах атаки (тобто коли передня кромка крила розташована нижче від задньої). При збільшенні кута між крилом і потоком підіймальна сила та сила опору зростають; при $\varepsilon = 15 - 20°$ підіймальна сила досягає найбільшої величини і потім швидко зменшується; сила опору продовжує зростати. Літати вигідно на таких кутах атаки, при яких підіймальна сила велика, а опір малий.

Відношення підіймальної сили до сили опору називається аеродинамічною якістю, або просто якістю машини. Якість буває найбільшою при кутах атаки 4—8°. Якість дозвукового крила буває тим більшою, чим вужче та довше крило. Такі крила роблять у планерів і літаків з великою дальністю польоту, як, наприклад, у літаків АНТ-25, на яких були здійснені рекордні перельоти з Москви в Америку. Якщо якість крила дорівнює, наприклад, 20, то це означає, що сила, потрібна для просування крила, в двадцять раз менша від ваги вантажу, який крило може нести.

Підіймальна сила виникає тому, що повітря, обдуваючи крило, відхиляється вниз (рис. 10). Намагаючись по інерції рухатися в попередньому напрямі, повітря діє на крило з силою, напрямленою вгору. При цьому повітря, обтікаючи опуклий верхній бік дозвукового крила, вимушене пройти більший шлях, ніж повітря, що обтікає його нижню поверхню. Тому швидкість течії над крилом збільшується, а тиск зменшується. Різниця тиску над крилом і під крилом створює силу, напрямлену вгору. Зміну тиску повітря при обдуванні крила можна виявити, вивівши на його поверхню манометричні трубки.

Надзвукове крило має тонкий профіль, гостру передню кромку та майже плоску поверхню. При набіганні надзвукового потоку на нижню поверхню крила, встановленого під деяким кутом до потоку, виникають ударні хвилі, тиск підвищується і повітря відхиляється вниз (рис. 10). Підвищення тиску на нижньому боці крила створює підіймальну силу, напрямлену вгору.

Підіймальну силу крила можна виразити алгебраїчною формулою:

$$P = c_y S_{\text{кр}} \rho \frac{w^2}{2},$$

де ρ — густина повітря в технічних одиницях маси на *куб. м*, S — площа крила в *кв. м*, w — швидкість в *м/сек*; c_y називається коефіцієнтом підіймальної сили. Коефіцієнт підіймальної сили дозвукового крила можна заздалегідь розрахувати за методом Жуковського або виміряти шляхом продувок в аеродинамічній трубі.

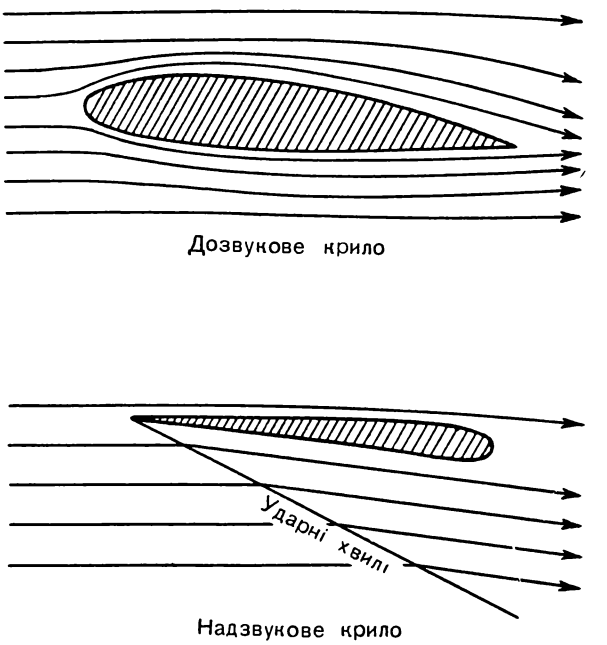


Рис. 10. Обтікання дозвукових і надзвукових крил.

Для плоскої пластинки, розташованої під кутом ε до надзвукового потоку, можна вивести співвідношення:

$$c_y = 0{,}07 \frac{\varepsilon}{\sqrt{M^2-1}},$$

де M — число Маха для потоку, що набігає на крило (остання формула справедлива тільки при $M>1$).

Підіймальна сила крила повинна зрівноважувати вагу літальної машини. Найменша швидкість, при якій підіймальна сила (при найбільшому c_y) дорівнює вазі, називається злітною швидкістю. Чим більша вага, що припадає на одиницю площі, або «навантаження» на крило, тим більша швидкість польоту, при якому машина може триматися в повітрі. Із збільшенням висоти густина зменшується. Для того щоб підіймальна сила могла подолати силу ваги, швидкість польоту повинна збільшуватися: літати вище — значить літати швидше й далі.

ЛІТАКИ

Літаком називається літальна машина, основними частинами якої є крило, двигун, органи керування й посадочні пристрої (рис. 11, 12, 13). Дозвукові літаки, що літають при $M < 0{,}7$, приводяться в рух двигунами з повітряними гвинтами. Білязвукові, надзвукові літаки, що літають при $M > 0{,}7$, приводяться в рух реактивними двигунами. Менш швидкохідні гвинтові літаки досі не вийшли з ужитку, бо вони можуть пролітати без посадки та без заправки пальним значно далі, ніж реактивні. Крім того, вони мають меншу посадочну швид-

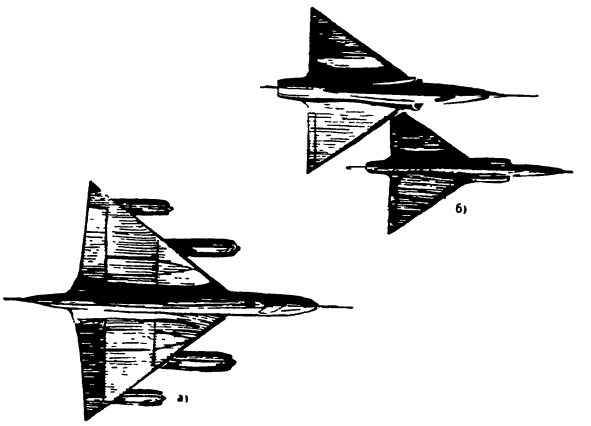


Рис. 11. Надзвукові літаки: а) бомбардувальник; б) винищувачі.

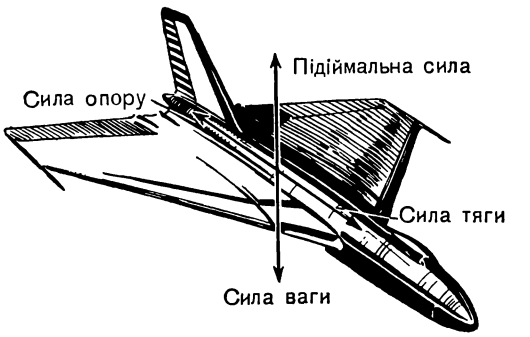


Рис. 12. Сили, що діють на літак при горизонтальному польоті.

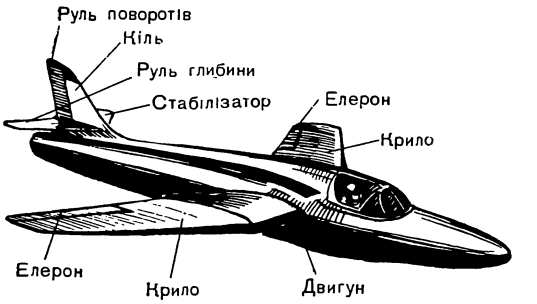


Рис. 13. Органи керування літаком.

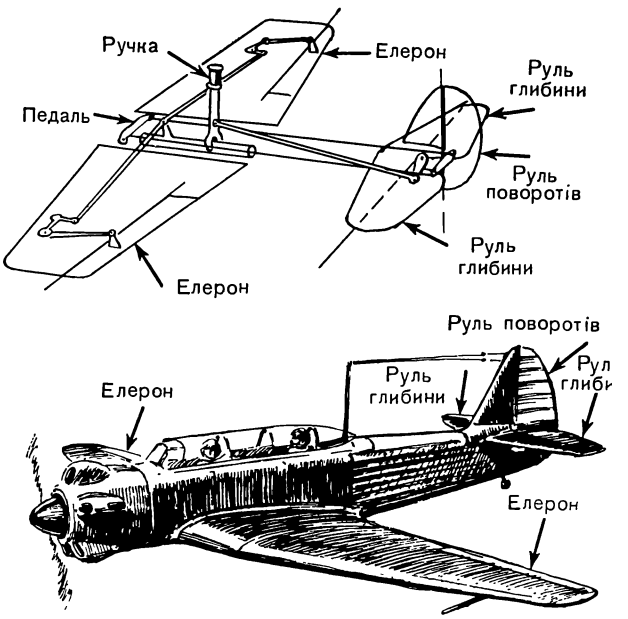


Рис. 14. Важелі керування літаком.

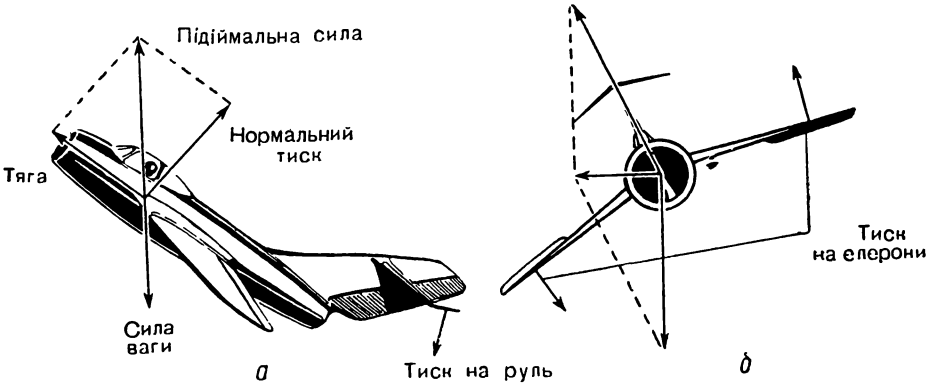


Рис. 15. Сили, діючі на літак: а) при зльоті, б)при віражі.

кість, що особливо важливо в районах, де немає великих, добре устаткованих аеродромів.

Сили, які діють на літак при рівномірному горизонтальному польоті, зображені на рис. 12. Вага літака при достатній швидкості польоту зрівноважується підіймальною силою крила. Сили опору, які діють на крило й на окремі частини літака, зрівноважуються силою тяги двигуна.

Літак конструюється так, щоб при польоті він був у стані стійкої рівноваги: якщо рвучкий вітер або будь-яка інша сила нахилить літак, підіймальна сила нахиленого крила стане більшою, ніж піднятого крила (бо починається ковзання на крило), і поверне літак у вихідне положення. Якщо хвіст літака занесе вбік, то на вертикальну площину — кіль — повітря буде тиснути з силою, яка поверне літак на попередній курс. Якщо хвіст літака задереться вгору, то на горизонтальну площину — стабілізатор — діятиме сила, яка вирівняє машину (рис. 13).

Для керування польотом на літаку є рухомі площини — рулі та елерони (рис. 13). Рулі звичайно розміщуються на хвості літака. Руль поворотів є продовженням кіля; руль глибини є продовженням стабілізатора. Елеронами називаються рухомі площини на кінцях крил. Рулі та елерони приводяться в рух педалями та ручкою, які розташовані перед сидінням льотчика (рис. 14). За допомогою рулів та елеронів літак робить підйоми, розвороти, спуски, петлі і такі еволюції в повітрі, на які не здатні ні птахи, ні комахи (рис. 16).

З л і т. Льотчик сідає в кабіну, засуває ковпак, застібає запобіжний пояс і включає двигун. Виникає сила тяги, яка примушує літак котитись по землі. Розбігаючись, літак набирає швидкості, підіймальна сила крила зростає і, нарешті, стає трохи більшою від ваги: літак відривається від льотного поля. Швидкість дедалі збільшується, льотчик тягне ручку на себе: рулі глибини повертаються і стають до потоку під від'ємним кутом атаки. Виникає знижуюча сила, яка примушує хвіст літака опуститися. Ніс напрямляється вгору, і літак починає набирати висоту. Сили, які діють на літак під час набирання висоти, показані на рис. 15, *а*. Зверніть увагу, що при набиранні висоти тиск на крило менший від ваги, бо підіймання відбувається під дією рівнодійної сили тяги двигуна і тиску на крило. Літаки, у яких тяга двигуна більша від ваги, можуть злітати вертикально при пульовій підіймальній силі крила (рис. 35).

Г о р и з о н т а л ь н и й п о л і т. Набравши висоту, льотчик переміщає ручку від себе й вирівнює машину. При цьому ніс літака стає на лінії горизонту. Сили, які діють на літак при горизонтальному польоті, показані на рис. 12. Сила тяги при горизонтальному польоті в кілька разів менша від ваги. Відношення ваги до сили тяги називається якістю літака. Якість гвинтового пасажирського літака досягає 10—15, реактивного — 4—7, надзвукового винищувача— 2—3.

Р о з в о р о т (віраж). Щоб повернути важку машину, яка летить з великою швидкістю, потрібна велика доцентрова сила. Вона утворюється відповідною зміною напряму підіймальної сили крил. При правому повороті льотчик накреняє машину праворуч, рухаючи ручку праворуч, і одночасно натискає на праву педаль (рис. 14). Правий елерон підіймається, лівий — опускається; виникає пара сил, яка примушує літак накренитися праворуч (рис. 15, *б*). Підіймальна сила крила напрямлюється всередину повороту: саме вона і примушує літак пройти по колу. Щоб літак не почав знижуватися, нормальний тиск на крило повинен збільшитися так, щоб вага зрівноважувалася його вертикальною складовою. Для цього льотчик або збільшує кут атаки, діючи рулями глибини, або набирає швидкість. В обох випадках треба збільшити тягу, додавши газу. При крутому віражі підіймальна сила буває

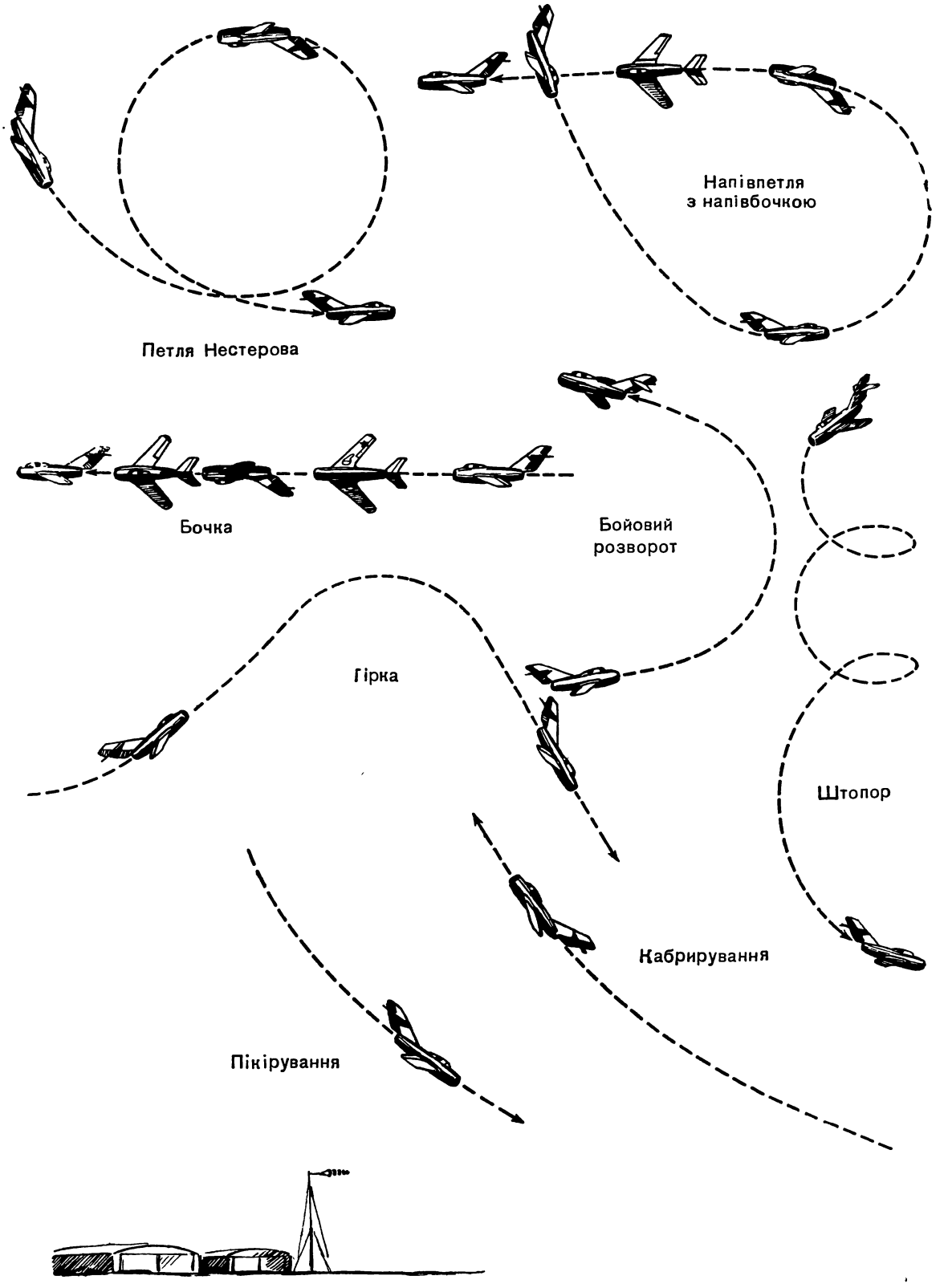


Рис. 16. Еволюції літаків у повітрі.

в кілька разів більша від ваги. Крутий віраж з креном почав уперше виконувати російський льотчик П. М. Нестеров (1887—1914).

Перевантаження. Відношення діючої сили до ваги називається перевантаженням: $П = \frac{F}{G}$. Перевантаження виникають при зміні величини або напряму швидкості: при віражі, розгоні та при інших еволюціях. Перевантаження відчувають і літак, і льотчик, і пасажири. Чим крутіший віраж і чим більша швидкість, тим більше перевантаження. При надмірному перевантаженні літак може розвалитися в повітрі. Шкідливе перевантаження й для людини: кров відливає від голови, внутрішні органи намагаються розірвати сполучні тканини. При п'ятикратному перевантаженні нетренована людина може втратити свідомість. Льотчики швидкісних літаків зміцнюють свій організм і тренуються, щоб привчити себе до великих перевантажень; Валерій Павлович Чкалов, як зареєстровано самопишучими приладами, витримував дев'ятикратне перевантаження.

Чим більша швидкість, тим більший радіус віража, який можна виконати, не перевищуючи допустимого перевантаження. Так, наприклад, при швидкості 2500 *км/год* можна зробити розворот з радіусом, не меншим від 10 *км*. Безпілотні протизенітні крилаті торпеди (рис. 22) можуть витримувати більші перевантаження, виконувати більш швидкі еволюції; тому пілотований літак не може ухилитися і врятуватися від самонавідного снаряда. При прямолінійному і рівномірному польоті $П = 1$. В умовах невагомості $П = 0$.

Вищий пілотаж. М. Є. Жуковський математично розрахував, що, крім зльоту, горизонтального польоту, розворотів та зниження, літак здатний виконувати різні еволюції в повітрі. Нестеров у Росії і Пегу у Франції майже в один і той самий день влітку 1913 р. виконали «мертву петлю», відкривши дорогу вищому пілотажу, який набув широкого розвитку під час першої світової війни. Нестеров перший з пілотів зрозумів, що для крутого повороту потрібний глибокий крен. «У повітрі скрізь опора»,— говорив він. Тепер літаки літають і вертикально, і похило, і вгору колесами, виконують бочки, штопори, перевороти, карусель, гірки, імельмани та інші фігури (рис. 16).

Потужність і швидкість. Для того щоб літак летів швидше, сила тяги і потужність двигуна повинні збільшуватись. Якщо висота польоту і кут атаки сталі, то сила опору збільшується прямо пропорціонально квадрату швидкості. Потужність двигуна, як відомо з механіки, дорівнює добутку сили тяги на швидкість. Отже, потужність, затрачувана на просування літака, зростає пропорціонально кубу швидкості. Якщо, наприклад, на початку другої світової війни на гвинтомоторному винищувачі, який літав з швидкістю близько $M = 0{,}5$, був двигун потужністю порядку 1000 *к. с.*, то для того щоб при сталому c_x швидкість зросла вдвоє і почала дорівнювати швидкості звуку, потрібна була б потужність $1000 \cdot 2^3 = 8000$ *к. с.*, а для польоту з подвійною швидкістю звуку — потужність $1000 \left(\frac{2}{0{,}5}\right)^3 = 64\,000$ *к. с.* Такий поршневий двигун важив би більше 30 *Т*.

Гвинтові двигуни при білязвукових швидкостях стають непридатними, бо завдяки звуковому бар'єру опір, якого зазнають лопаті пропелера, різко зростає, а його к. к. д. спадає: робота двигуна майже цілком затрачується на те, щоб обертати гвинт, а не на те, щоб тягнути літак. Тому гвинтові літаки ніколи не досягали швидкості 800 *км/год*; на більш швидкохідних машинах застосовуються тільки реактивні двигуни.

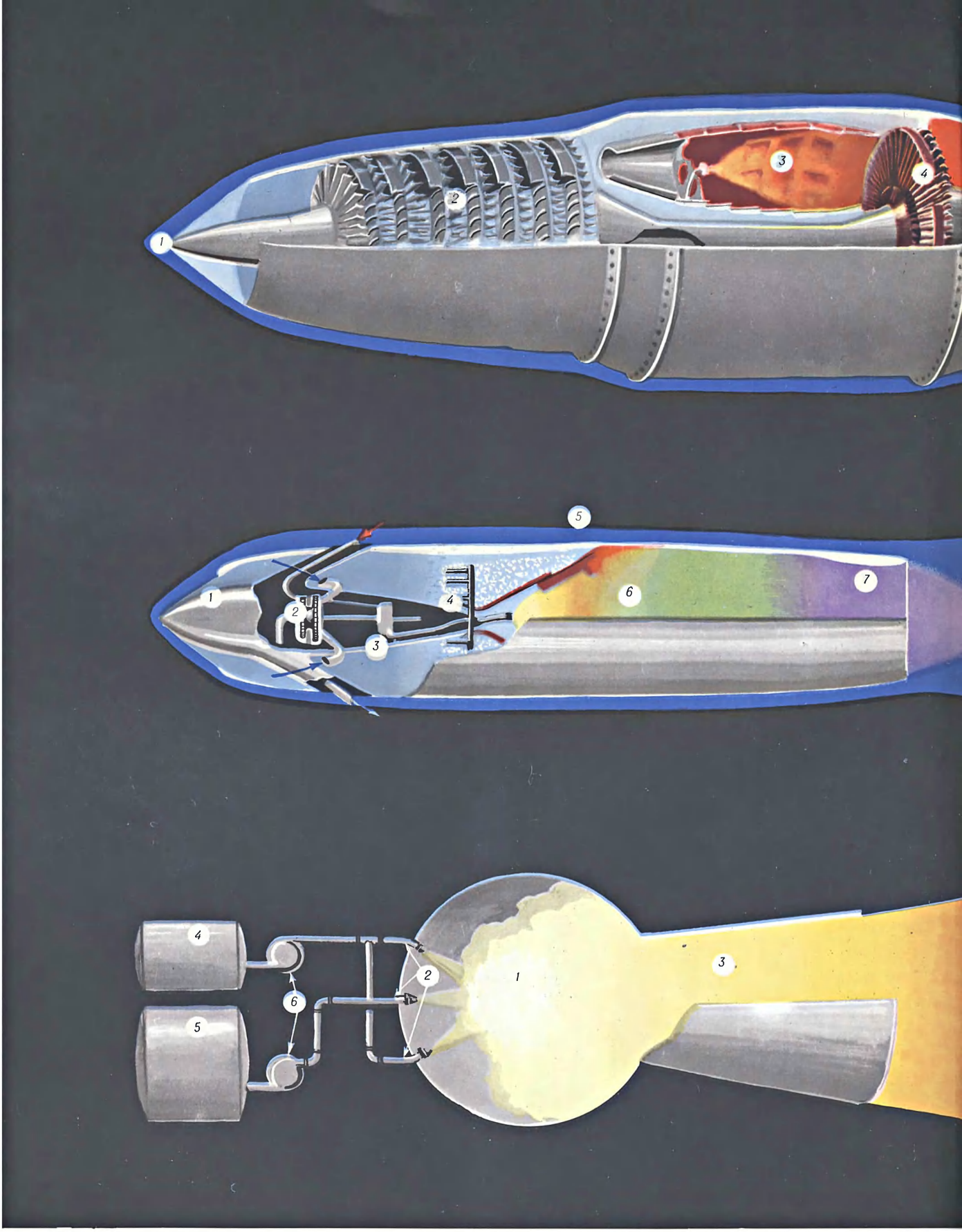
На щастя, потужність, потрібна для польоту, зростає так дуже з швидкістю тільки при сталій висоті польоту. Але при збільшенні швидкості зростає й підіймальна сила. Для того щоб вона не стала більшою від ваги,

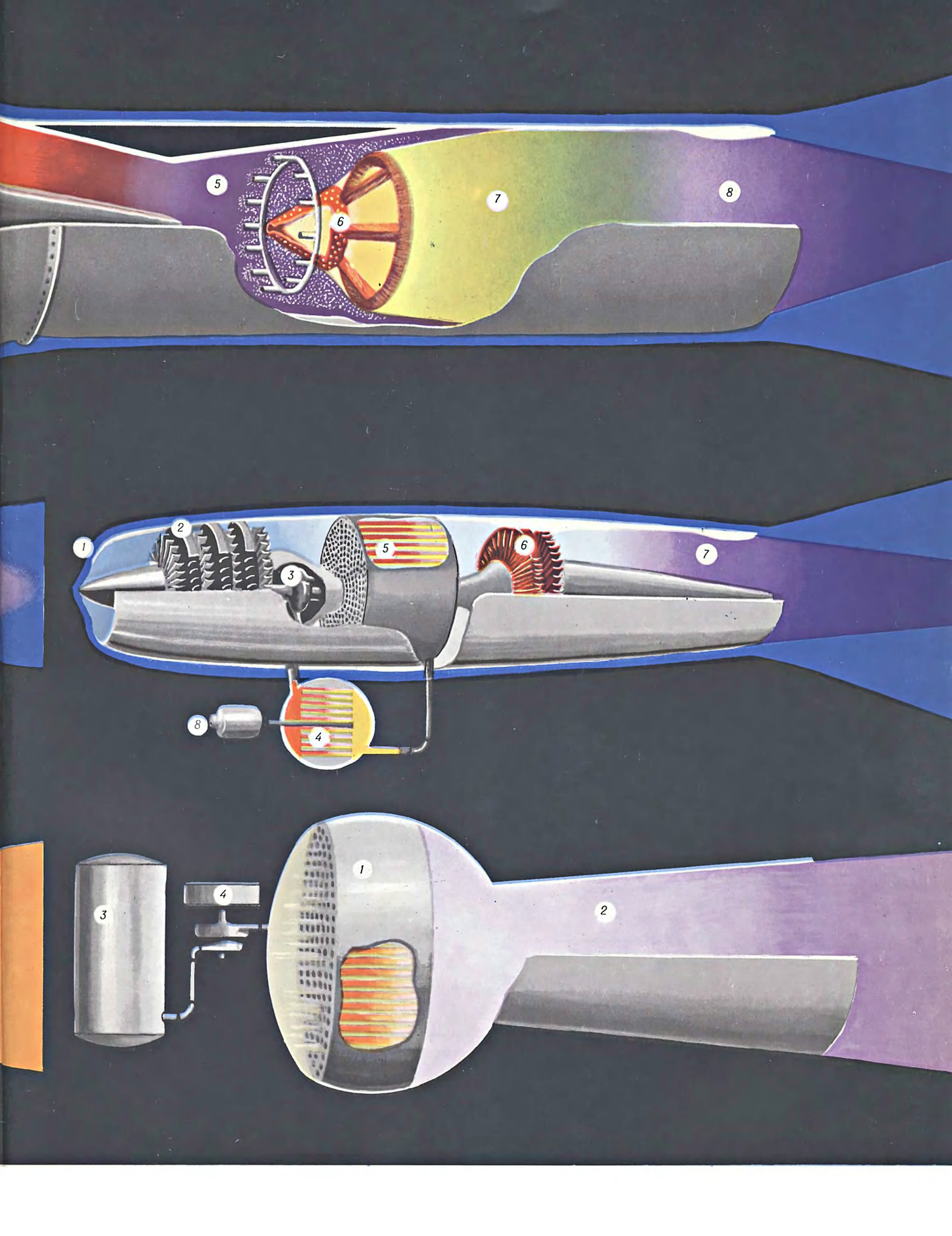
---

Таблиця 10. Аеродинамічна труба: *1.* Газгольдери. *2.* Ресивер. *3.* Дозвукова течія. *4.* Надзвукова течія. *5.* Робоча камера. *6.* Приміщення для спостерігачів.

Таблиця 11. Різні види авіаційних двигунів. Вгорі—турбореактивний двигун з форсажною камерою: *1.* Повітрозабірник. *2.* Компресор. *3.* Камера згоряння. *4.* Турбіна. *5.* Форсунки. *6.* Стабілізатор. *7.* Форсажна камера. *8.* Сопло. У другому ряді ліворуч — прямоточний повітряний реактивний двигун: *1.* Повітрозабірник. *2.* Повітряна трубка. *3.* Насос. *4.* Паливні форсунки. *5.* Стабілізатор. *6.* Камера згоряння. *7.* Сопло. У другому ряді праворуч — ядерний турбореактивний двигун: *1.* Повітрозабірник. *2.* Компресор. *3.* Насос. *4.* Ядерний реактор. *5.* Теплообмінник. *6.* Турбіна. *7.* Сопло. *8.* Регулюючий стержень. У нижньому ряді ліворуч — рідинний ракетний двигун на молекулярному пальному: *1.* Камера згоряння. *2.* Форсунки. *3.* Сопло. *4.* Бак для пального. *5.* Бак для окислювача. *6.* Насоси. У нижньому ряді праворуч — рідинний ракетний двигун на ядерному пальному: *1.* Реактор. *2.* Сопло. *3.* Бак для робочої речовини. *4.* Насоси.

5
3
4
2
1
6
1


1
2
3
4
5
6
7


5
6
7
8
1
2
3
4
5
6
7
8
1
2
3
4

льотчик або зменшує кут атаки (при цьому якість літака погіршується), або піднімається в такі розріджені шари атмосфери, де, незважаючи на зростання швидкості, підіймальна сила дорівнює вазі. Якість літака залишається попередньою, отже, і потрібна тяга не змінюється. При сталій тязі (але при змінній висоті польоту) потрібна потужність зростає прямо пропорціонально першому ступеню швидкості. На надзвукових винищувачах встановлюються реактивні двигуни з тягою в 5000—10 000 *кГ*, які при M = 2 розвивають потужність, яка перевищує потужність машин великого океанського пароплава, хоч вага таких авіаційних двигунів становить лише 1,5—3 *Т*.

Надзвукові польоти. Літаки з реактивними двигунами легко перемагають звуковий бар'єр і літають далеко швидше від звуку: швидкість серійних літаків наближається до M = 3; стеля перевищує 28 *км*. Проектуються літаки, які повинні літати ще вище з швидкостями до M = 10. На шляху до створення таких літальних машин доведеться подолати ряд труднощів, зв'язаних з нагрівом літака і двигуна при гальмуванні набігаючого повітря. Балістичні ракети, що летять за межами атмосфери, не знають цієї перешкоди.

Під час польоту на надзвукових літаках спостерігається багато цікавих явищ. Чи можна наздогнати вчорашній день? На швидкісному літаку — можна. Справді, колова швидкість Землі на широті Москви дорівнює $465 \cdot \cos 56° = 260$ *м/сек* = 935 *км/год*. Таку швидкість може розвивати пасажирський реактивний літак ТУ-104. Почавши політ прямо на захід під час заходу Сонця, льотчик і пасажири весь час бачитимуть перед собою Сонце, яке заходить, скільки б політ не тривав, бо літак, що летить в західному напрямі з такою самою швидкістю, з якою обертається Земля, буде нерухомим відносно Сонця.

На реактивному літаку, що пролітає 2500 *км* за годину, можна перегнати Сонце: вилетівши на захід після заходу Сонця, льотчик і пасажири через деякий час побачать новий схід Сонця, але не на сході, а на заході: вони доженуть Сонце, що сховалося за горизонтом. Якщо політ почався, скажімо, 17 березня о 3 годині ранку в Москві, то через три години він закінчиться в Америці, але не сьогодні і не завтра, а вчора — 16 березня об 11 годині вечора. Справді, східноамериканський час на 7 годин відстає від московського. Тому на початку нашого перельоту в Америці було ще 16 березня, 8 година вечора. Політ продовжується три години; він закінчиться 16 березня об 11 годині за місцевим часом. Почавши зворотний переліт увечері наступного дня — о 18 годині 17 березня, літак через 3 години приземлиться в Москві, але там уже буде п'ята година ранку 18 березня.

Швидкість пасажирських літаків навряд чи доцільно збільшувати більш ніж до 2000—2500 *км/год*, бо вже тоді вони за 4—5 годин можуть прилітати в будь-який пункт Азії, Африки або Америки, а переліт до Австралії забере менше 8 годин. Найдальша мандрівка не буде дуже тривалою, щоб пасажир встиг так само добре виспатися, як у кур'єрському поїзді на лінії Москва—Ленінград. Дальше зростання швидкості, не даючи практичної користі, буде зв'язане з труднощами, викликаними складністю посадки, з динамічним нагрівом при польоті.

Посадка є однією з найтрудніших частин польоту, особливо на надзвукових літаках. Льотчик дає ручку від себе й переводить літак на зниження. Перед самою Землею, зменшивши газ, він бере ручку на себе: кут атаки зростає, опір збільшується, і літак, швидко втративши швидкість, а з нею й підіймальну силу, «провалюється» й торкається поверхні льотного поля. Після того як кінетична енергія літака витратиться на тертя в гальмах, машина зупиняється: політ закінчено. Посадочна швидкість, яку літак має перед приземленням, навіть в учбових машин буває не меншою від 50 *км/год*. Чим більша максимальна швидкість літака,

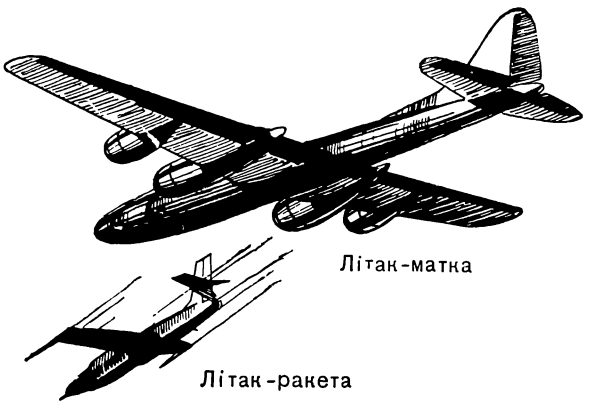


Рис. 17. Відокремлення літака-ракети від авіаматки.

Таблиця 12. Гіперзвуковий літак найближчого майбутнього.

Рис. 18. Скафандр для висотних польотів.

тим більша і його посадочна швидкість. Якщо не вжити особливих заходів, то посадочна швидкість надзвукових машин буде настільки велика, що зробити посадку стане неможливим. Для зниження посадочної швидкості швидкісні літаки постачаються механізованими крилами з рухомими закрилками й перекрилками, завдяки яким в момент посадки підіймальна сила крила істотно зростає, а посадочна швидкість зменшується. Все ж таки вона лишається дуже великою: порядку 200 *км/год* — більше граничної швидкості автомобіля ЗІЛ-110. Щоб не розбити машину, льотчик повинен володіти великою майстерністю. Посадити надзвуковий літак можна тільки на бетоновану доріжку і після того, як витратиться пальне, так що вага машини стане значно меншою, ніж була при зльоті.

Гранична висота польоту, або стеля, літака настільки вища, наскільки більша швидкість, але із збільшенням швидкості зростає потужність, потрібна для пересування. Тому стеля визначається тією граничною потужністю, яку здатний розвивати двигун при роботі на висоті. Найбільша висота, досягнена радянським літаком Т-431 з турбореактивним двигуном, дорівнює 28 760 *м*. Літаки з РРД при деяких польотах підіймалися вище 38 *км*. Літак з РРД укріплюється на літаку-матці; на висоті порядку 9 *км* він відчіпляється й продовжує політ самостійно, набираючи висоту і швидкість (рис. 17). Розробляється літак, який зможе досягти сотень кілометрів висоти, плануючи облетіти навколо земної кулі й зробити посадку.

На висоті понад 7 *км* густина атмосфери стає такою малою, що повітря не вистачає для дихання: настає кисневе голодання, або «гірська хвороба». Тому пасажирські літаки та деякі військові машини, призначені для польотів у стратосфері (стратоплани), мають герметичні кабіни, куди нагнітається кондиціоноване повітря заданої температури, густини й вологості. При будь-якій висоті польоту тиск у кабіні стратоплана не спадає нижче половини атмосферного, так що кисневого голодування не відчувається. При висотних польотах у негерметичних кабінах застосовуються спеціальні костюми з шоломами, які захищають пілота від зниження тиску, від кисневого голодування та від теплового випромінювання стінок машини (рис. 18).

При достатньому збільшенні швидкості надзвукове крило здатне нести літак на дуже великій висоті: розрахунки показують, що при $M=10$ висота польоту може досягати 50 *км*. Такі літаки придатні тільки для воєнних цілей. Пасажирські літаки, що мають швидкість $M = 2 — 2{,}5$, літатимуть на висотах порядку 20 *км*.

Гіперзвукові літаки. За нашого часу провідними авіаційними інститутами розробляються гіперзвукові літаки, призначені для польотів при $M>6$. Ударні хвилі, що утворюються при гіперзвуковому обтіканні крила й фюзеляжу, взаємодіють одна з одною — інтерферують. (Докладніше про явище інтерференції хвиль розповідається в статті «Світло та його застосування» у цьому самому томі ДЕ). При несприятливій інтерференції хвильовий опір може зрости вдвоє. Навпаки, при вдалому сполученні крила і фюзеляжу або застосуванням додаткових поверхонь можна добитися того, щоб ударні хвилі гасили одна одну: теоретично хвильовий опір можна довести до нуля. Зовнішній вигляд одного з можливих варіантів такого літака показано на кольоровій таблиці (стор. 305).

Для зниження хвильового опору зручно розміщувати фюзеляж під крилом або підвішувати один літак під другим. У такому разі маленький літак розміщується на такій відстані від великого літака-матки, що взаємодія повітряних потоків зведе хвильовий опір до найменшої величини. Літак-матка має турбореактивні двигуни. На дочірньому літаку, який несе корисний вантаж, встановлюються РРД або прямоточні двигуни. Досягнувши заданої висоти і швидкості, дочірній літак відчіпляється і продовжує гіперзвуковий політ самостійно, а літак-матка повертається на базу.

З історії авіації. Спроби збудувати літальну машину, яка б дала людині можливість літати подібно до птахів, робились протягом усієї історії людства. Але доти, поки не було створено відповідного двигуна, ці спроби були приречені на невдачу, бо мускульної енергії людини недостатньо для польоту. Збудувати літак стало можливим тільки після винайдення легкої теплової машини. У 1881 р. капітан Російського військово-

морського флоту О. Ф. Можайський, провівши успішні досліди з літаючими моделями, дістав «привілей» на винайдений ним літак з плоским прямокутним крилом і фюзеляжем у вигляді дуже легкого човна, який приводила в рух сконструйована Можайським парова машина з повітряними гвинтами. На цьому літаку були рулі, колісне шасі та деякі інші пристрої, застосовувані і на сучасних літаках. Подолавши численні грошові та організаційні труднощі, винахідник, який працював в обстановці ворожого недовір'я з боку чиновників царського уряду, збудував свою машину. На жаль, достовірних відомостей про його польоти не збереглося.

На кілька років пізніше німецький інженер Лілієнталь зробив ряд ковзаючих польотів на збудованому ним балансирному планері, керування яким пілот здійснював переміщенням центра ваги свого тіла. Під час одного з таких польотів планер втратив стійкість і Лілієнталь загинув. У 1901 р. американські механіки брати Райт збудували планер з бамбука та полотна і провели на ньому ряд вдалих польотів. Планер запускався з пологого схилу горба за допомогою примітивної катапульти, яка складалася з невеликої брусованої вишки з блоком і вірьовки з вантажем. Влітку брати вчились літати, а решту часу працювали в своїй велосипедній майстерні, заощаджуючи гроші для продовження дослідів. Узимку 1902—1903 рр. вони зробили бензиновий двигун внутрішнього згоряння, встановили його на своєму планері і 17 грудня 1903 р. зробили перші вдалі польоти, найдовший з яких хоч і тривав лише 59 секунд, але показав, що літак здатний злетіти і триматись у повітрі.

Удосконаливши літак і досягнувши певної льотної майстерності, брати Райт у 1906 р. опублікували свій винахід. З цього моменту почався бурхливий розвиток авіації в багатьох країнах світу. Через три роки французький інженер Блеріо, перелетівши на літаку своєї конструкції через Ла-Манш, довів здатність сухопутної машини літати над морем. Менш ніж через 20 років на одномісному сухопутному літаку був зроблений переліт з Америки в Європу через Атлантичний океан, а через 10 років, улітку 1937 р., троє радянських льотчиків — В. П. Чкалов, Г. П. Байдуков і О. В. Бєляков — на літаку А. М. Туполєва АНТ-25 перелетіли з Москви в Америку через Північний полюс. Через кілька днів М. М. Громов, А. Б. Юмашов і С. А. Данилін, пролетівши тим самим маршрутом, встановили світовий рекорд дальності по-

льоту по прямій, покривши без посадки 10 300 *км*.

Поруч з дальністю зростала вантажопідйомність, висотність і швидкість літаків. Перший надважкий літак був побудований у Росії. Цей чотиримоторний гігант «Ілля Муромець» настільки перевищував усі тодішні машини, що за рубежем довго не могли повірити в існування такого літака. У 1913 р. «Ілля Муромець» побив світові рекорди дальності, висотності й вантажопідйомності.

Швидкість літака братів Райт лише небагато перевищувала 50 *км/год*. За перше десятиріччя її удалось збільшити вчетверо: рекорд швидкості в 1913 р. досяг 203 *км/год*. За наступні десять років рекордна швидкість збільшилась ще вдвоє, перевищивши 400 *км/год*. Ще за десять років швидкість зросла на 75%, досягнувши в 1933 р. 709 *км/год*. За наступні роки гвинтомоторні літаки щільно підійшли до межі своїх можливостей: у 1940 р. рекордна швидкість досягла 752 *км/год*. Цієї цифри гвинтомоторні літаки не перевищили до наших днів.

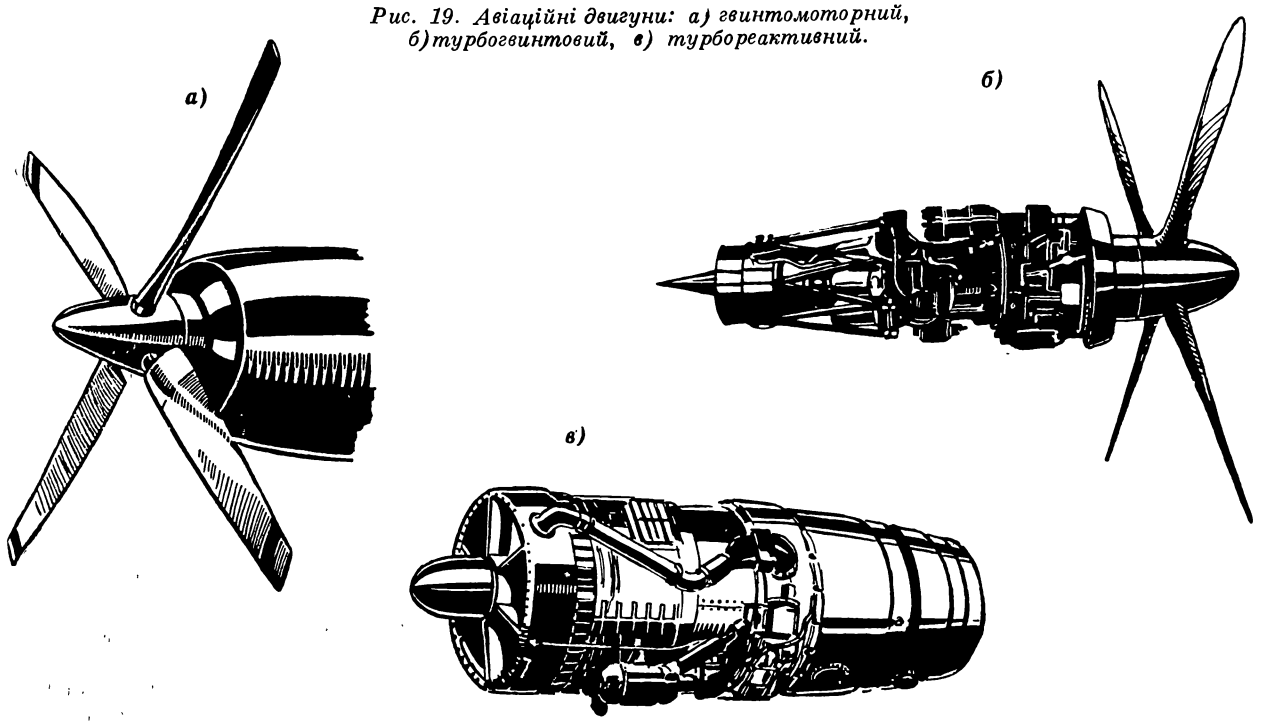
Таке саме явище відбувалося і при зростанні висоти: піднятися вище 18 *км* на гвинтомоторному літаку з поршневим двигуном виявилося неможливим. Різкого збільшення швидкості і висоти вдалося досягти, перейшовши від гвинтомоторних літаків до реактивних. Неминучість цього переходу передбачив Ціолковський, який писав, що за ерою літаків гвинтових настане ера літаків реактивних.

Реактивні двигуни появилися в 1939 р. Перший політ на реактивному літаку в СРСР здійснив льотчик-випробувач В. К. Федоров у 1940 р. Восени 1945 р. на англійському реактивному літаку був встановлений рекорд швидкості, що перевищив 950 *км/год*. Сучасні реактивні літаки підіймаються на висоту майже 40 *км* і розвивають швидкість, яка перевищує 3000 *км/год*.

Нинішні реактивні літаки ще дуже далекі від межі своїх можливостей: у 1958 р. вони літали лише трохи швидше потроєної швидкості звуку. Але, як говорилося вище, уже проектується літак, який повинен літати на висоті до 50 *км* з швидкістю М.= 10.

М. Є. Жуковський та його школа. Видатні досягнення авіації були підготовлені роботами вчених, які створили авіаційну науку. Провідне місце серед них посідає Микола Єгорович Жуковський (1847—1921), якого В. І. Ленін називав батьком російської авіації. Жуковський опрацював теорію, що дає

Рис. 19. Авіаційні двигуни: а) гвинтомоторний, б) турбогвинтовий, в) турбореактивний.



можливість розрахувати підіймальну силу та визначити найвигіднішу форму профілю доввукового крила, розв'язав задачу про роботу гребного гвинта, створив основи розрахунку літака, розробив способи аеродинамічних досліджень. Прагнучи до того, «щоб засоби наших аеродинамічних лабораторій стали у відповідність до могутності нашої Батьківщини», він організував перші лабораторії, оснащені аеродинамічними установками і досконалими приладами для наукових досліджень. Тепер мрія Жуковського цілком здійснилась: створена ним лабораторія розвинулась у всесвітньовідомий Аерогідродинамічний інститут — ЦАГІ. На основі організованого Жуковським у 1919 р. Інституту інженерів повітряного флоту в нашій країні виріс ряд авіаційних інститутів у Москві, Ленінграді, Харкові та в інших містах. Жуковський написав сотні наукових праць, особливе місце серед яких посідає книга, що вийшла в 1912 р., «Теоретичні основи повітроплавання». Він зумів передати свої знання, досвід і творчу енергію багатьом учням і товаришам. З їх числа вийшов ряд видатних учених: академіки С. О. Чаплигін, В. П. Ветчинкін, Б. С. Стєчкін, А. М. Туполєв, Б. М. Юр'єв та ін.

АВІАЦІЙНІ ДВИГУНИ

Принцип дії двигуна. Авіаційний двигун служить для створення сили тяги. З фізики відомо, що сили виникають тільки при взаємодії тіл. Сила тяги виникає при взаємодії двигуна з навколишнім повітрям. За третім законом Ньютона, сила, з якою двигун діє на відкидуване повітря, дорівнює силі тяги, з якою повітря тисне на двигун. Ця сила, за другим законом Ньютона, дорівнює щосекундному приросту кількості руху. Якщо, наприклад, двигун відкидає 100 *кг*, або 10,2 технічної одиниці маси, газу на секунду з швидкістю 550 *м/сек*, а швидкість набігаючого потоку, що дорівнює швидкості польоту, — 250 *м/сек*, то сила тяги становитиме:

$$10{,}2(550 - 250) = 3060 \ кГ.$$

Сила тяги дорівнює добутку маси, що відкидається щосекунди $m = \frac{G}{g}$, на приріст швидкості Δw:

$$R = \frac{G\Delta w}{g}.$$

Маса, яка відкидається щосекунди, називається витратою G. Витрата вимірюється в кілограмах за секунду. Дільник g перетворює кілограми на технічні одиниці маси.

Є кілька різних видів авіаційних двигунів (рис. 19): поршневі двигуни з повітряними гвинтами (рис. 19, *а*), газотурбінні гвинтові двигуни (скорочено ТГД, рис. 19, *б*), турбореактивні двигуни (ТРД, рис. 19, *в* і кол. табл. на стор. 304), прямоточні повітряно-реактивні двигуни (ППРД) і ракетні двигуни (кол. табл. на стор. 304). Всі ці двигуни, за винятком поршневих, можуть працювати як на хімічному, так і на ядерному пальному. Двигун перетворює енергію пального в роботу просування літака.

Повітряний гвинт. Найекономічнішим «рушієм» для літаків, що летять повільніше $\frac{2}{3}$ швидкості звуку, є повітряний гвинт, або пропелер (рис. 19,*а* і *б*). Є дво-, три- і навіть чотирилопатні гвинти. Кожна лопать гвинта являє собою невелике крило, розташоване до набігаючого повітря під найзручнішим кутом атаки. Окремі точки лопаті обертового гвинта на літаку, що летить, рухаються відносно набігаючого повітря по гвинтових лініях. На рис. 20 видно, що чим далі від осі розташована ділянка лопаті, яку розглядаємо, тим більш пологу лінію вона описує відносно набігаючого повітря. Для того щоб усі ділянки лопаті зустрічали набігаюче повітря під найзручнішим кутом атаки, кут установки лопаті (тобто кут між лопаттю і площиною обертання) повинен зменшуватися в міру віддалення від осі.

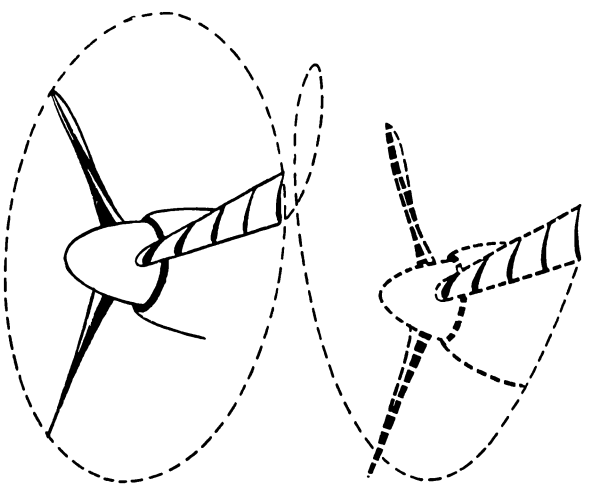


Рис. 20. Кут установки лопатей повітряного гвинта зменшується при віддаленні від осі.

На рухому лопать, так само як і на рухоме крило, діють з боку повітря сила опору (яку перемагає двигун) і сила нормального тиску, яка є корисною тягою гвинта. Із збільшенням швидкості польоту гвинтові лінії, описувані окремими точками лопатей, стають крутішими, кут атаки зменшується, а разом з ним зменшується і сила тяги. Для того щоб тяга гвинта не зменшувалась з швидкістю, застосовують гвинти з поворотними лопатями: при збільшенні швидкості польоту лопаті автоматично повертаються, так що кут атаки лишається найзручнішим. При наближенні відносної швидкості лопаті до звукової величини виникає сила хвильового опору; к. к. д. гвинта спадає, так що при $M \approx 1$ він стає непридатним для дальшого руху літака. Для обертання гвинтів застосовуються поршневі і газотурбінні двигуни.

Теорія гвинта була розроблена М. Є. Жуковським і В. П. Ветчинкіним і розвинута англійським ученим Глауертом.

Поршневі двигуни, або мотори (рис. 19,*а*), були єдиними двигунами, що застосовувались в авіації протягом перших сорока років її існування. Поршневі авіадвигуни внутрішнього згоряння працюють по чотиритактному циклу, подібно до двигунів автомобілів і тракторів. Відмітною особливістю авіадвигунів є їх мала вага і велика потужність: авіамотор, що розвиває 2000 *к. с.*, важить близько 1200 *кГ*; вага, що припадає на кожну кінську силу, або його «питома вага», становить всього 0,6 *кГ/к.с.* (кінь важить близько 300 *кГ*).

Мала питома вага досягається тим, що для виготовлення авіамоторів застосовуються сплави, що поєднують найбільшу міцність з найменшою вагою, і, крім того, розміри кожної частини двигуна роблять такими малими, щоб діючі сили наближалися до гранично допустимої величини. При невеликому спрацюванні двигун стає непридатним, бо його міцність виявляється недостатньою. Тому строк роботи мотора не перевищує кількох сотень годин.

Поршневі авіадвигуни досить економічні: вони витрачають лише 0,19—0,24 *кГ* бензину на годину на кожну кінську силу.

Турбогвинтові двигуни (ТГД, рис. 19, *б*) розвивають ще більшу потужність і мають ще меншу вагу, ніж поршневі. ТГД складається з повітрозабірника, компресора,

нагрівача, турбіни і вихідного сопла. Всмоктуване повітря надходить у компресор, де тиск підвищується у 8—15 раз, і проходить до нагрівача. Там його внутрішня енергія і температура зростають ще в 2—3 рази. В існуючих тепер ТГД на хімічному пальному нагрівачем є камера згоряння; у розроблюваних новітніх двигунів, які використовують ядерну енергію, нагрівачем є теплообмінник, що складається з тонких трубок для протікання повітря, які обмиваються розплавленим металом (наприклад натрієм), нагрітим до 900—1000° в ядерному реакторі. Стиснене і гаряче повітря протікає через турбіну і віддає свою енергію її робочому колесу, яке починає швидко обертатись. Приблизно половина енергії, яку одержує турбіна, витрачається на обертання компресора; друга половина йде на обертання повітряного гвинта. ТГД, що працюють на хімічному пальному, почали застосовуватися наприкінці 40-х років. Двигун, який розвиває потужність у 5000 *к. с.*, важить менше від 2000 *кГ*, він витрачає 0,2—0,3 *кГ* пального на годину на кінську силу. Радянські турбогвинтові двигуни конструкції Н. Д. Кузнецова встановлені на літаках ТУ-114, АН-10, ІЛ-18 та ін. Турбогвинтові літаки літають з швидкостями 600—800 *км/год*. Радянський військовий літак без посадки і заправки пальним у повітрі в липні 1959 р. за 22 години пролетів більше 17 тис. *км*.

Турбореактивні двигуни (ТРД, рис. 19, *в* і кол. табл. на стор. 304) складаються з повітрозабірника, компресора, нагрівача, турбіни і реактивного сопла. Повітря, протікаючи повітрозабірником, частково гальмується, при цьому його тиск і температура зростають тим більше, чим більшою була початкова швидкість. У компресорі тиск повітря збільшується ще в кілька разів. У нагрівачі стиснене повітря нагрівається до такої температури, яку тільки можуть витримати лопатки турбіни. Стиснений і нагрітий газ віддає робочому колесу турбіни приблизно половину своєї «вільної» енергії. Половина, яка залишилась під час протікання через реактивне сопло, перетворюється в кінетичну енергію струменя. У результаті кількість руху газів зростає і виникає реактивна тяга. Щоб ще збільшити тягу, між турбіною і соплом влаштовують форсажну камеру, де при догорянні пального температура зростає до 2000—2500°, тобто до значно більшої величини, ніж можуть витримувати лопатки турбіни.

ТРД ще легші, ніж турбогвинтові двигуни: турбореактивний двигун з тягою 5000 *кГ* важить менше 1500 *кГ*; при швидкості, яка дорівнює швидкості звуку, він розвиває корисну потужність, більшу 20 000 *к. с.*; його «питома вага»— менша 75 *Г* на кінську силу.

При швидкості, більшій 800 *км/год*, ТРД стають економічнішими, ніж ТГД, бо із зростанням швидкості робота гвинта погіршується.

Економічність ТРД характеризується питомою витратою пального. Питома витрата дорівнює витраті пального в кілограмах за годину на кожний кілограм тяги R:

$$Ce = \frac{G}{R}.$$

Питома витрата залежить від швидкості польоту: при роботі на місці вона дорівнює близько 0,8 *кГ* на годину на 1 *кГ* тяги. Із збільшенням швидкості Ce зростає, тому застосовувати ТРД при $M > 3{,}0$ стає невигідним.

Прямоточні повітряно-реактивні двигуни (ППРД, кол. табл. на стор. 304) приходять на зміну турбореактивним при $M > 3$. Якщо швидкість велика, то тиск у повітрозабірнику підвищується настільки, що компресор, а разом з ним і турбіна стають зайвими: всі рухомі частини зникають, залишається повітрозабірник, нагрівач і реактивне сопло. У надзвуковому повітрозабірнику встановлюється гострокінцеве тіло, схоже на носок

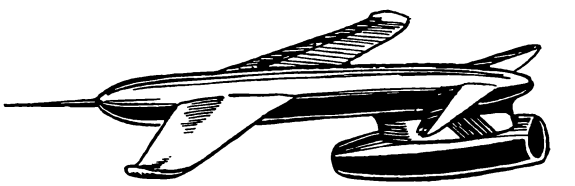


Рис. 21. Літаюча мішень.

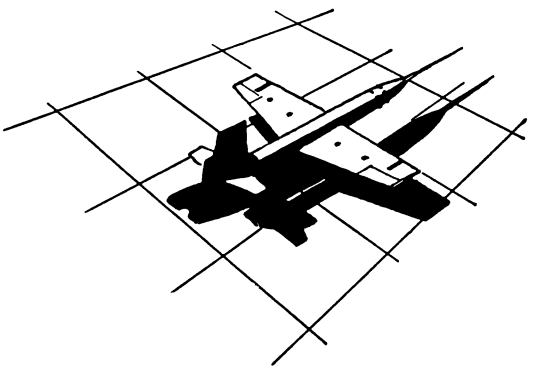


Рис. 22. Протизенітна ракета.

снаряда, при набіганні на яке виникають косі ударні хвилі; це зроблено для зменшення втрат енергії при гальмуванні потоку.

Повітря, стиснуте в повітрозабірнику і підігріте в нагрівачі, із зростаючою швидкістю витікає з реактивного сопла, створюючи силу тяги, яка дорівнює щосекундному приросту кількості руху. ППРД можуть застосовуватись при швидкостях від M = 0,7 до M = 10 (а можливо, й ще більших). Ясно, що нерухоме повітря в ППРД не потече; тому, щоб запустити такі двигуни, літак потрібно раніше розігнати за допомогою ТРД або ракети.

Літаюча мішень з ППРД (рис. 21) скидається на великій висоті з літака-матки. Крилаті протизенітні ракети (рис. 22) запускаються за допомогою стартової порохової ракети. ППРД є єдиними двигунами, придатними для гіперзвукових польотів в атмосфері при M = = 4 — 10. При M>3 ППРД витрачають менше пального і мають меншу вагу, ніж ТРД. Перші в світі ППРД були збудовані в СРСР І. А. Меркуловим та випробувані як допоміжні двигуни на винищувачі системи Полікарпова льотчиком П. Є. Логіновим у 1939 р.

Гвинтові турбореактивні і прямоточні двигуни можуть діяти тільки в межах земної атмосфери. Для польотів у міжпланетному просторі, а також для розгону літаків служать ракетні двигуни.

Ракетні двигуни (РД) працюють незалежно від навколишньої атмосфери, бо вони несуть з собою все, що потрібно для створення сили тяги: пальне та окислювач або (в атомних двигунах) робочу речовину. Є порохові ракетні двигуни — ПРД і рідинні ракетні двигуни — РРД; розробляються ракети на ядерному пальному. Ракети — найстародавніші й одночасно найсучасніші теплові машини. Вони були винайдені в Китаї багато сторіч тому. Ракети застосовувалися на святах як звеселяючі вогні та на війні для підпалювання ворожих міст. Тепер вони широко застосовуються для науково-дослідних цілей. Радянські штучні супутники Землі були запущені за допомогою величезних балістичних ракет. Ще потужнішими були перші в світі радянські космічні ракети. За допомогою ракет буде розв'язана проблема міжпланетних польотів. Ракетний двигун дає змогу перекинути бойовий вантаж у будь-яку точку на поверхні земної кулі, причому на переліт потрібно менше години.

У принципі будова ракети дуже проста: порохова ракета складається з камери, наповненої пресованим порохом, та вихідного сопла або простого отвору. Пресований порох не вибухає, а повільно згоряє; тиск у камері підвищується, і порохові гази з великою швидкістю витікають із сопла, діючи на ракету з деякою силою реакції. Швидкість речовини перед витіканням дорівнює нулю, тому сила реакції дорівнює добуткові секундної витрати (що дорівнює кількості згоряючої речовини) на швидкість витікання. Чим більші температура й тиск перед витіканням і чим менша молекулярна вага газів, тим більшою буде їх швидкість. Будова рідинного ракетного двигуна дещо складніша: він складається з камери згоряння, сопла, турбонасосів і баків з пальним та окислювачем. Як пальне можна використати спирт, гас, анілін, гідразин; як окислювачі — рідкий кисень, азотну кислоту, перекис водню, рідкий фтор та ін. Пальне й окислювач витискаються з баків стиснутим азотом або накачуються насосами. Ядерна ракета замість камери згоряння матиме реактор, а замість пального й окислювача — запас робочої речовини з малою атомною вагою: рідкий водень, аміак, гідразин, воду або гідрид літію. Нагрівшись у реакторі і перетворившись у дуже гарячий газ, робоча речовина витікатиме із сопла.

Чим більша швидкість витікання, тим більша питома тяга ракетного двигуна.

Питомою тягою називається тяга, одержувана при витіканні одного кілограма робочої речовини або пального за секунду. Якщо при витраті G *кГ/сек* ракета розвиває тягу R *кГ*, то питома тяга дорівнює:

$$J = \frac{R}{G} \text{ сек.}$$

Чим більша питома тяга, тим більша кінцева швидкість, яку може розвинути ракета.

Питома тяга ракетних двигунів

Тип двигуна	Пороховий	Рідинний	Ядерний
Питома тяга	120—270	200—400	400—800

Час, протягом якого ракета може підійматися вертикально вгору з працюючим двигуном, прямо пропорціональний питомій тязі. Справді, тяга ракетного двигуна при вертикальному зльоті більша від початкової ваги апарата $P_{поч}$. Запас пального становить 50—90% від повної ваги. Поділивши запас пального на щосекундну витрату, знайдемо тривалість дії двигуна:

$$t = \frac{P_{пал}}{G} = \frac{P_{пал}}{R} J \text{ сек.}$$

Чим більша питома тяга, тим більший час розгону і тим більшу швидкість встигає розвинути ракета. Німецька ракета далекої дії, яку застосовували в 1944—1945 рр., мала відносний запас пального в 68% і питому тягу 200; тривалість дії двигуна становила лише 70 сек., але за цей час ракета розвивала швидкість близько 1500 *м/сек*. Радянська балістична ракета, яка вивела за межі земного тяжіння першу в світі космічну ракету, мала більшу питому тягу та більший запас пального і розвинула швидкість понад 11 000 *м/сек*. Для міжпланетного польоту потрібна ракета з ще більшою питомою тягою або з ще більшим відносним запасом пального. Докладніше про проблеми міжпланетних сполучень розповідається в статті «Радянські ракети і штучні супутники Землі», вміщеній у цьому томі ДЕ.

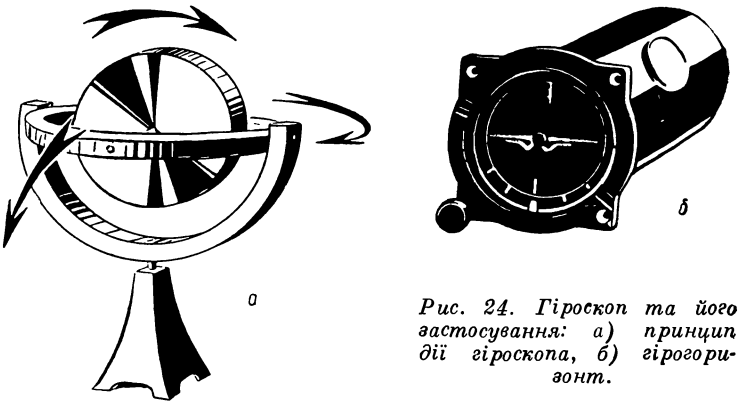


Рис. 24. Гіроскоп та його застосування: а) принцип дії гіроскопа, б) гірогоризонт.

УСТАТКУВАННЯ ЛІТАКА ПРИЛАДАМИ

Найскладнішою і найдорожчою частиною устаткування літака є встановлені на ньому прилади. Авіаційні прилади такі різноманітні, що в короткому нарисі про них можна дати лише найбільш загальне уявлення.

Прилади розміщуються на панелі перед сидінням пілота (рис. 23). Центральне місце займають радіолокатор, гірокомпас, гірогоризонт, спідометр, висотомір (альтиметр) і термометр, який показує температуру атмосферного повітря. По обидва боки панелі розміщені прилади, які дають можливість судити про роботу двигунів: покажчик кількості обертів — тахометр; витратомір, який показує витрату пального; рівнемір, що показує кількість пального в баках, і термометри, які показують температуру масла, пального та відповідальних частин двигуна.

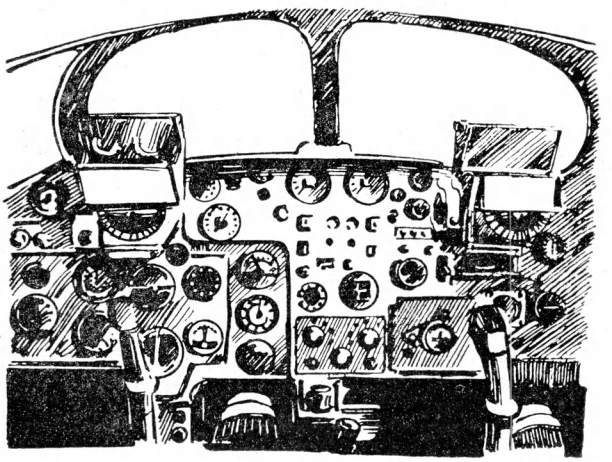


Рис. 23. Прилади двомісного літака.

Кожний двигун багатомоторного літака має свій комплект приладів. Принципи дії приладів різні; існують прилади гіроскопічні, аеродинамічні, електромагнітні, інерційні, термоелектричні, радіолокаційні та ін. Ми ознайомимося тільки з найголовнішими.

Основною частиною всіх гіроскопічних приладів є г і р о с к о п — укріплений на кардановому підвісі маховичок, який швидко обертається. Підвіс побудований так, що корпус приладу можна повертати як завгодно, не впливаючи на маховичок. Вісь обертового гіроскопа намагається зберегти стале положення в просторі (рис. 24). Під впливом зовнішніх дій гіроскоп робить складні рухи. Математичну теорію гіроскопа розробив акад. О. М. Крилов (1863—1945).

Ті, хто катається на велосипеді, на практиці обізнані з поведінкою гіроскопа, бо велосипедні колеса так само є гіроскопами. Швидко обертаючись, колесо намагається зберегти стале положення своєї осі в просторі. Тому, чим більша швидкість, тим легше зберегти рівновагу під час їзди на велосипеді. При нахилянні корпусу набік, наприклад праворуч, переднє колесо не тільки нахиляється, але водночас само повертається праворуч. Це і становить основну властивість гіроскопів: обертовий гіроскоп намагається зберегти стале положення осі в просторі, але під дією сили, яка намагається змінити площину обертання, гіроскоп повертається не в площині дії сил, а під прямим кутом до неї

(рис. 24,*а*). Властивості гіроскопа використані в гіроскопічних приладах.

Гірогоризонт складається з гіроскопа на карданову підвісі, вміщеного в корпус, на передньому склі якого намальовано контур літака (рис. 24, *б*). Вісь гіроскопа зберігає стале положення в просторі, як би не повертався літак з встановленим на ньому приладом. З підвісом гіроскопа з'єднана стрілка, яка весь час лишається паралельною горизонту. Положення, яке займає намальований літак відносно нерухомої стрілки, відповідає справжньому положенню літака відносно горизонту. Стежачи за гірогоризонтом, льотчик може вести літак в густому тумані або в темряві.

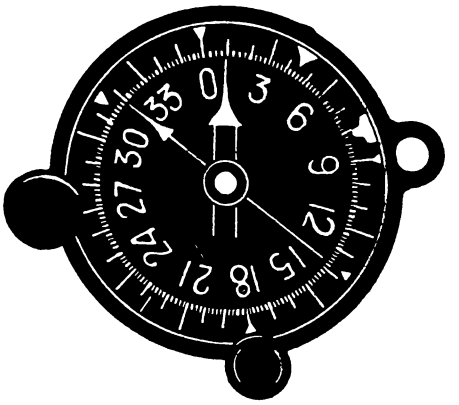


Рис. 25. Альтиметр.

Гірокомпас складається з гіроскопа, вісь якого завдяки дії особливих приладів весь час лишається паралельною географічному меридіану. З підвісом гіроскопа з'єднана стрілка, стежачи за якою льотчик веде літак за заданим курсом.

Крім гіроскопічних приладів, на літаку є кілька аеродинамічних приладів, які сприймають повний і статичний тиск набігаючого повітря.

Спідометр, або махметр, складається з пружної мембрани, до якої підведено трубки повного і статичного тиску, виведені за борт літака. При збільшенні швидкості різниця між повним і статичним тиском збільшується, мембрана вигинається й рухає стрілку. Ясно, що на покази приладу впливають тиск і температура атмосферного повітря, так що льотчику доводиться вносити поправки.

Альтиметр, або висотомір, побудований, як звичайний барометр-анероїд. Із збільшенням висоти тиск зменшується, мембрана випинається і рухає стрілку (рис. 25). Чим менша температура повітря, тим менший його об'єм і тим швидше зменшується тиск з висотою. У покази альтиметра також треба вводити поправку на температуру.

Важливе місце на літаку займає радіоустаткування.

Радіонапівкомпас складається з невеликої обертової кільцевої антени, приймача й стрілочного приладу, схожого на компас. Приймач настроюється на будь-яку діючу радіостанцію. Обертова антена сприймає радіохвилі тільки в ту мить, коли її площина буває перпендикулярна до напряму хвиль (рис. 26).

Стрілка приладу показує, в якому положенні буває антена в момент одержання сигналу, тобто напрям на радіостанцію.

Радіолокатор складається з передавача, що посилає переривчасті сигнали на ультракоротких хвилях, приймача й електронно-променевої трубки — кінескопа. Ультракороткохвильовий сигнал відбивається від будь-якої зустрінутої перешкоди, повернувшись, сприймається приймачем і, діючи на електронний промінь, дає на екрані кінескопа світлу точку. Чим далі розташований відбиваючий предмет, тим довше радіосигнал ітиме до нього й назад, тим далі вийде світла точка від початкового положення. Радіолокатор не тільки попереджає про існування перешкоди — зустрічного літака, гори, башти і тому подібного, але й показує, в якому напрямі і на якій відстані вона знаходиться. Якщо напрямити промінь локатора вниз, він буде вказувати відстань до земної поверхні, тобто висоту польоту. Є панорамні локатори, на екрані яких виникає своєрідна контурна карта місцевості, що знаходиться під літаком.

Постійно діючі повітряні лінії устатковані радіомаяками.

Радіомаяк являє собою радіостанцію, яка посилає напрямлений радіосигнал, що нагадує

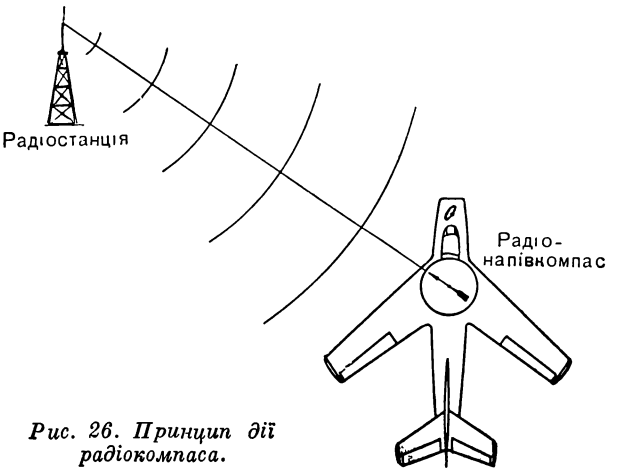


Рис. 26. Принцип дії радіокомпаса.

промінь прожектора. Льотчик, орієнтуючись на промінь маяка і включаючи навушники, чує сигнали. При відхиленні від осі променя праворуч характер сигналів змінюється інакше, ніж при відхиленні ліворуч. Тому льотчику неважко утримувати літак у правильному напрямі.

Приладне та радіоустаткування дає змогу підтримувати регулярне повітряне сполучення в будь-який час доби і майже при будь-якій погоді.

Стежачи за приладами, льотчик оцінює положення літака і, діючи на рулі, вносить у політ відповідні поправки. Для полегшення керування на важких і швидкісних літаках рулі приводяться в рух електричними або гідравлічними службовими машинами. Таким чином, пілот перетворюється в зв'язуючу ланку між рульовими машинами та приладами. Але людський мозок сприймає, узагальнює й робить висновки не миттю: цей процес триває не менше кількох десятих часток секунди.

Система, в якій між приладами й машинами встановлено безпосередній електричний або механічний зв'язок, в багатьох випадках може діяти швидше й надійніше від пілота. Такий пристрій називається автопілотом. Багато літаків, а також керовані снаряди ведуться автопілотами, які можуть реагувати на сприймані сигнали в кілька разів швидше, ніж льотчик. Пілотований літак, як ми вже казали, не може ухилитися від керованого автопілотом самонавідного снаряда, який здатний «міркувати» значно швидше і витримувати більші перевантаження, ніж людина.

ПЛАНЕРИ

Планером називається безмоторний літак. За винятком двигуна, планер має ті самі основні частини. Планер запускається на тросі проти вітру (як повітряний змій) стартовою командою, автомобілем або літаком. Злетівши, планерист відчіпляє трос і переходить до самостійного польоту, ковзаючи вниз, як по похилій площині (рис. 27). Неважко зміркувати, що відношення відстані, проходжуваної планером у горизонтальному напрямі l, до зниження h дорівнює аеродинамічній якості планера k:

$$\frac{l}{h} = k = \frac{P}{R} = \frac{w}{w_{вер}}.$$

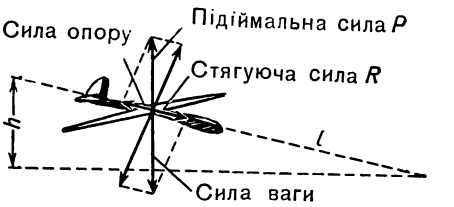


Рис. 27. Сили, що діють на планер.

Рис. 28. Учбовий планер.

Рис. 29. Напівбалістичний планер.

Тому швидкість зниження планера невелика; потрапивши у висхідну течію повітря, яка звичайно буває увінчана купчастою хмарою, планер може набрати висоту в тисячі метрів і полетіти на сотні кілометрів від місця зльоту. В повітрі планер здатний виконувати всі фігури вищого пілотажу. Планерист, який сидить у відкритій кабіні, не оглушений ревінням моторів, насолоджується відчуванням польоту; планеризм — захопливий вид спорту. Посадочна швидкість планера мала, тому

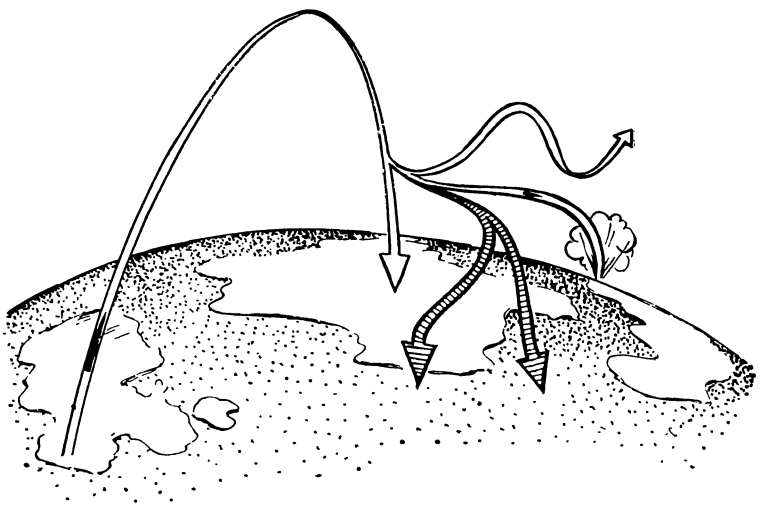


Рис. 30. Передбачувана траса польоту напівбалістичного планера.

він може сісти на дуже невелику площадку. Планери застосовуються для перевезення вантажів, для висадки десантів, для тренування пілотів (рис. 28).

Існуючі планери літають з швидкостями кілька десятків кілометрів за годину. Проектуються надзвукові напівбалістичні планери (рис. 29), які, стартуючи за допомогою РРД, розвиватимуть швидкість в тисячі метрів за секунду. Пролетівши по балістичній кривій у безповітряному просторі, планер повернеться в атмосферу, але підіймальна сила крил знову напрямить його вгору (рис. 30). Розрахунки показують, що, рухаючись хвилеподібною кривою, як рикошетуючий від води камінь, напівбалістичний планер зможе за півтори-дві години облетіти навколо земної кулі або, летячи за наперед заданим маршрутом, зможе досягти будь-якої точки на земній поверхні. Такі польоти, крім воєнних цілей, можуть служити перехідним ступенем до створення міжпланетних кораблів, здатних повернутися назад і зробити посадку на Землі після закінчення мандрівки на одну з планет сонячної системи.

ВЕРТИКАЛЬНО-ЗЛІТАЮЧІ МАШИНИ

Швидкісні літаки потребу́ють великих устаткованих аеродромів з бетонованими злітно-посадочними доріжками. Тепер створено ряд вертикально-злітаючих машин, здатних піднятися з лісової галявини, з міської площі, з палуби корабля або будь-якої іншої невеликої площадки.

Вертоліт, або гелікоптер, являє собою безкрилу літальну машину, підіймальна сила якої створюється великим гвинтом — ротором, що обертається в горизонтальній площині (рис. 31, 32). Моделі вертольотів були вперше випробувані ще Ломоносовим. Підіймальна сила лопатей обертового гвинта, або ротора, утримує вертоліт в повітрі, а сила опору, яку перемагає двигун, примушує всю машину обертатися в бік, протилежний до обертання гвинта. Для зрівноважування

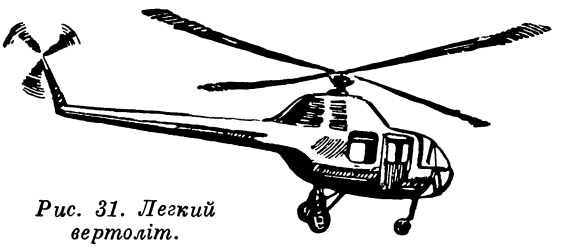


Рис. 31. Легкий вертоліт.

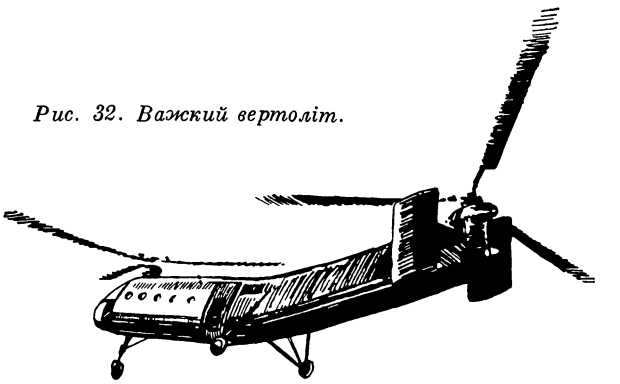


Рис. 32. Важкий вертоліт.

«реакції ротора» служить маленький гвинт, установлений на хвості вертольота. Головка ротора має дуже дотепну будову, що дозволяє їй нахилятися в будь-який бік. При цьому підіймальна сила відхиляється від вертикалі й тягне машину в потрібному напрямі: ротор служить і підйомником, і рушієм.

Будівництво вертольотів успішно розвивається в нашій країні. Радянським машинам належить ряд міжнародних рекордів. Так, у 1955 р. на вертольоті О. С. Яковлєва був піднятий вантаж в 4 *Т* на висоту 2000 *м*, а в 1956 р. на вертольоті М. Л. Міля була розвинута швидкість 187 *км/год* при польоті по 500-кілометровому маршруту. Весною 1959 р. на важкому вертольоті МІ-6 були встановлені світові рекорди підіймання вантажів 5 і 10 *Т* на висоту 5500 *м* і майже 5000 *м*.

Ротор вертольота приводиться в рух поршневим або газотурбінним двигуном, з яким він з'єднаний складною й важкою передачею. Значно простіші й легші реактивні вертольоти. Добрі можливості має газотурбінний вертоліт, в якому повітря, стиснуте компресором, подається в реактивні сопла, встановлені на

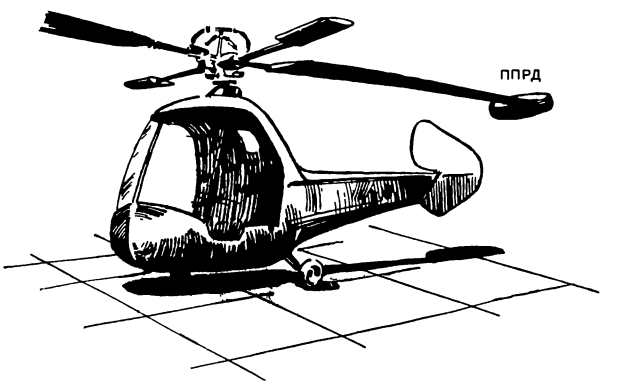


Рис. 33. Реактивний вертоліт.

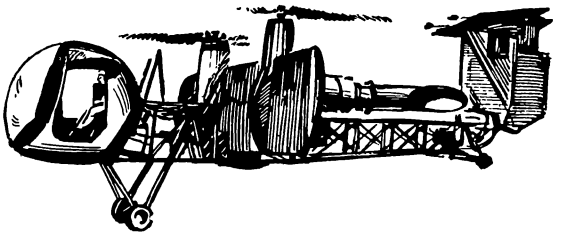


Рис. 34. Конвертоплан.

кінцях лопатей. Реакція повітряних струменів обертає ротор, як струмені пари обертають відому всім вертушку Герона Александрійського. Ще простіший реактивний вертоліт, на лопатях якого встановлено два ППРД (рис. 33). Доцентрова сила, що виникає при обертанні, використовується для подачі пального. Початкова розкрутка ротора проводиться за допомогою ручного інерційного стартера. Реактивні вертольоти не відчувають реакції ротора, бо двигуни розташовані на самих лопатях. Основним недоліком реактивних вертольотів є відносно велика витрата пального.

Вертольоти широко застосовуються для зв'язку з важкодоступними районами, при експедиціях (наприклад, в Арктиці, Антарктиді) для льодової розвідки, при гасінні лісових пожеж, для боротьби з шкідниками сільського господарства, при переправах, десантах і т. д.

Вертольоти принципіально не можуть розвивати швидкості, більшої від 360 *км/год*, бо при цьому лопать ротора, що рухається назустріч потоку, обтікається з швидкістю, більшою від 700 *км/год* і к. к. д. гвинта різко спадає. Значно швидше літають конвертоплани.

Конвертоплан — літак, повітряний гвинт або все крило з руховою установкою якого можуть повертатися на 90° (рис. 34). При зльоті гвинти конвертоплана ставляться у вертикальне положення, а при переході на горизонтальний політ повертаються паралельно осі машини. Конвертоплани розвивають таку саму швидкість, як і звичайні гвинтомоторні літаки. Але вони значно складніші й важчі від вертольотів, а тому підіймають відносно менший вантаж.

Вертикально-злітаючі літаки мають тягу, що перевищує їх початкову вагу (рис. 35). Літак, встановлюваний вертикально на хвостових стояках, злітає під

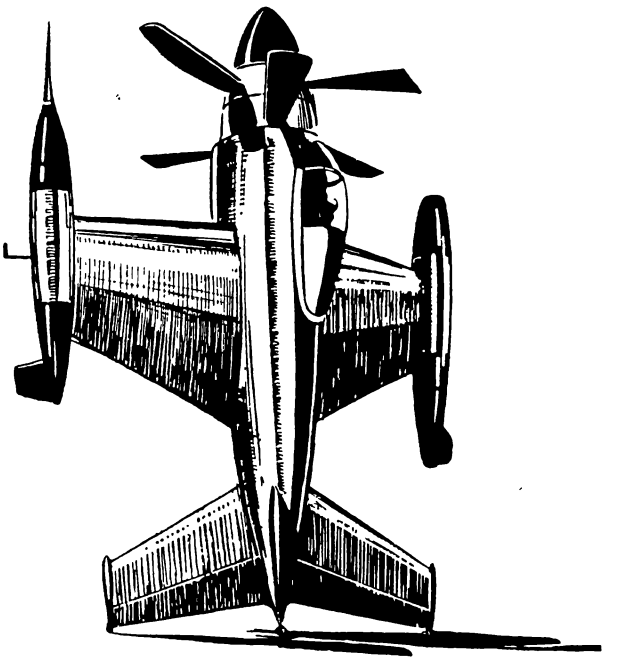


Рис. 35. Вертикально-стартуючий літак.

дією двох співвісних гвинтів, що обертаються в протилежні сторони, або реактивного двигуна. Набравши висоту і швидкість, він переходить на горизонтальний політ. Зниження провадиться вертикально, хвостом вниз. Якщо ж пальне витрачене, зниження може відбуватися так само, як і на звичайному літаку.

Ведуться роботи над створенням вертикально-злітаючого літака з поворотними реактивними двигунами, які служитимуть і для вертикального зльоту, і для горизонтального польоту.

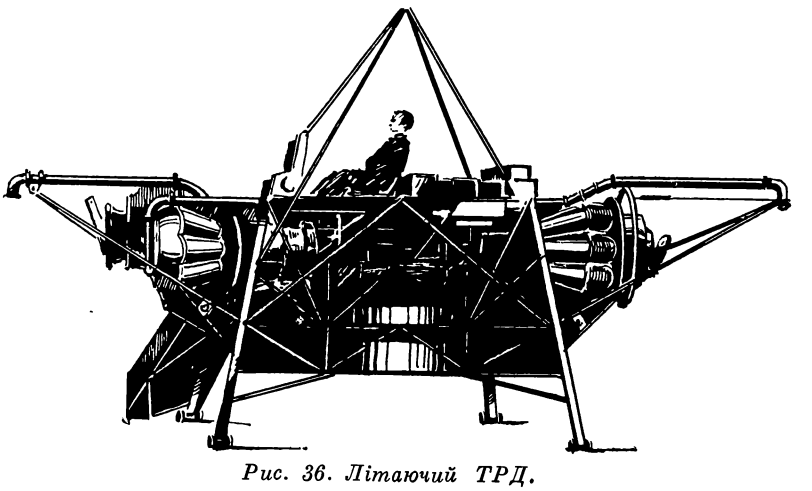


Рис. 36. Літаючий ТРД.

Літаючі двигуни (рис. 36). Реактивні двигуни вільно тримаються в повітрі, бо їх тяга в декілька разів більша від ваги. Для горизонтального просування влаштовуються особливі сопла. Практичного значення подібні установки поки що не мають.

Колеоптер являє собою вертикальнозлітаючий літак з кільцевим крилом (рис. 37). Зазор між крилом і корпусом використовується як прямоточний двигун. Колеоптер злітає за допомогою ракетного або турбореактивного двигуна, встановленого в корпусі, і, розвинувши надзвукову швидкість, переходить на ППРД. Колеоптери мають велику швидкопідйомність і міцність, але їх аеродинамічна якість менша, ніж у літаків з плоскими крилами.

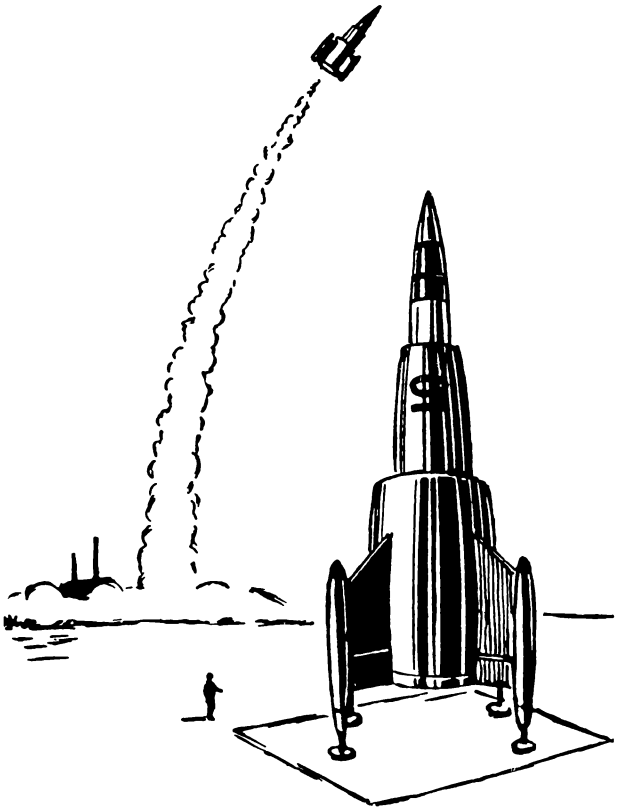


Рис. 37. Колеоптер.

МАЙБУТНЄ АВІАЦІЇ

Люди навчилися літати на рубежі XIX і XX ст. За минулі десятиріччя дальність літаків стала достатньою для безпосадочного польоту в будь-яку точку земної кулі. Висота наблизилася до 40 *км*; швидкість перевищила потрійну швидкість звуку. Яким же шляхом піде дальший розвиток авіації і чи є межа її можливостям?

Перш ніж відповісти на це питання, нагадаємо, що авіацією називають сукупність машин, призначених для польотів у межах земної атмосфери. Для такої авіації межі існують. Це висота до 50 *км* над рівнем моря: вище практично немає повітря, на яке могло б спиратися крило літака. Гранична швидкість M = 10 — — 20; дальше зростання швидкості обмежене тепловим бар'єром. Гранична дальність обмежена розмірами земної кулі, найбільша відстань на якій (з поверненням у вихідну точку) дорівнює 40 000 *км*. Для досягнення цих границь потрібні нові жаростійкі, міцні й легкі матеріали, а також нове пальне з вищим вмістом енергії, ніж у застосовуваних тепер нафтопродуктах. Таким значно теплотворнішим пальним є штучні речовини, які добувають хімічним способом із водню й бору, а також ядерне пальне.

Бороводневе пальне отруйне й може бути застосоване тільки на військових машинах. Для використання ядерного пального необхідно створити надійні легкі реактори. Діючий реактор випускає нейтрони й гамма-промені, згубні для всього живого. Щоб зробити ядерну силову установку безпечною, реактор оточують товстим і важким захисним шаром. Вага авіаційного ядерного двигуна з захищеним реактором становитиме десятки тонн. Ядерний літак зможе літати тим швидше й вище, чим більше вдасться підняти температуру реактора: до 1000° і вище (в реакторі першої в світі радянської атомної електростанції вода нагрівається приблизно до 300°). Дальність ядерного літака необмежена. На таких літаках можна буде підтримувати регулярний пасажирський і вантажний зв'язок між будь-якими пунктами на земній поверхні.

Уже в наші дні авіація перестала бути останнім досягненням науки. Значно більші можливості має ракетна техніка, найближчим завданням якої є організація сполучень з планетами сонячної системи, а потім і з іншими зоряними світами. Але про це буде докладно розказано в іншій статті.

РАДЯНСЬКІ РАКЕТИ І ШТУЧНІ СУПУТНИКИ ЗЕМЛІ

Можливо, вже багато тисяч років тому, дивлячись на нічне небо, людина мріяла про польоти до зірок. Міріади мерехтливих нічних світил спонукали її линути думкою в безмежні далі Всесвіту, будили уяву, примушуючи замислюватися над таємницями світобудови. Минали століття, людина все більше поширювала владу над природою, і тільки мрія про політ до зірок лишалася такою ж самою нездійсненною, як і тисячі років тому. Легенди і міфи всіх народів розповідають про польоти до Місяця, Сонця та зірок. Проте засоби для такого польоту, що пропонувала народна фантазія, були примітивними: колісниця, тягнена орлами, крила, прикріплені до рук людини...

У XVII ст. з'явилося оповідання французького письменника Сірано де Бержерака про політ на Місяць. Герой цього оповідання дістався до Місяця в залізному возику, над яким він увесь час підкидав сильний магніт. Притягаючись до нього, візок підіймався все вище над Землею, поки не досяг Місяця. Відомий англійський письменник Герберт Уеллс описав фантастичну мандрівку на Місяць в снаряді, корпус якого був зроблений з матеріалу, що не піддавався силі тяжіння.

Різні пропонували засоби для здійснення космічного польоту, але жодний учений, жодний письменник-фантаст за багато віків не міг назвати єдиного, що знаходиться в розпорядженні людини, засобу, з допомогою якого можна подолати могутню силу земного тяжіння і полинути в міжпланетний простір. Велика честь відкрити людям дорогу до зірок випала на долю нашого співвітчизника Костянтина Едуардовича Ціолковського.

Скромний калузький учитель зумів побачити в усім відомій пороховій ракеті прообраз могутніх космічних кораблів майбутнього. Його ідеї до цього часу служать і ще довго служитимуть основою створення ракет і освоєння людиною колосонячного простору.

Майже дві тисячі років минуло від того часу, як винахідники пороху — стародавні китайці — збудували перші ракети, але тільки Ціолковський показав, що єдиний літальний апарат, здатний проникнути за атмосферу і навіть назавжди покинути Землю, — це р а к е т а. Він не тільки обгрунтував загальні принципи, але й зробив докладні практичні розрахунки, в результаті яких знаменитий учений і дійшов висновку про необхідність створення р а к е т н и х п о ї з д і в, або, як ми тепер говоримо, б а г а т о с т у п і н ч а с т и х р а к е т, а також про необхідність створення ш т у ч н и х с у п у т н и к і в Землі.

Ціолковський зацікавився проблемою літання ще в 80-х роках минулого століття, коли й авіації, навіть найпримітивнішої, ще практично не існувало.

Щоправда, в цей же час в Росії працював другий найталановитіший інженер і винахідник Олександр Федорович Можайський. Багато років життя й самовідданої праці, так само як і Ціолковський, не маючи нізвідки підтримки, віддав він на створення літального апарата. У 1882—1884 рр. він збудував літак, що мав всі основні частини сучасних літаків: несуче крило, гвинтомоторну групу, фюзеляж, хвостове оперення, шасі. Але в умовах царської Росії визначний винахід не міг пробити собі дорогу. Він був закинутий і забутий. Помер невідомим і його творець.

Лише через десять років окремі самоуки-винахідники на Заході стали робити спроби побудувати літальні апарати, куди менш досконалі, ніж літак Можайського. В грудні 1903 р. американцям братам Райт удалося на збудованому ними літаку протриматися в повітрі 59 сек. (Цю дату західні історики схильні розглядати як початок «ери авіації»).

А за кілька місяців до їх польоту в Петербурзі була опублікована праця К. Е. Ціолковського під назвою «Дослідження світових просторів реактивними приладами», автор якої докладно розробив теорію ракети як єдиного двигуна, здатного понести людину до інших планет сонячної системи. Як же далеко наперед дивився видатний учений! Вже тоді він зумів дати математично точний розрахунок ракети, указати найвигідніше пальне для неї, дати ідею складної ракети і ще багато іншого, що ми тільки тепер, через п'ятдесят з лишком років, перетворюємо в життя.

Що ж являє собою ракетний двигун, на яких фізичних законах грунтується його дія?

Кожний знає, що постріл з рушниці супроводиться віддачею. Якби вага кулі дорівнювала вазі рушниці, вони розлетілися б з однаковою швидкістю і на однакові відстані. Віддача буде і при холостому пострілі, але, правда, значно менша.

Віддача виникає тому, що відкидувана маса газів створює реактивну силу, внаслідок якої може бути забезпечене пересування як у повітрі, так і в безповітряному просторі. І чим більша маса й швидкість витікаючих газів, тим більшу силу віддачі відчуває наше плече, тим сильніша реакція рушниці, тим більша реактивна сила.

Якщо ж патрон буде досить великий і весь час викидатиме безперервний струмінь газів, ми зможемо використати реактивну силу для пересування якого-небудь апарата, наприклад автомобіля.

Порохові ракети, які застосовували китайці, і порохові ракетні двигуни, широко застосовувані в сучасній авіації для збільшення швидкості літака на зльоті, в принципі мало відрізняються одні від одних. Будь-яка ракета складається з корпусу, камери згоряння і сопла. Пальне може міститися безпосередньо в камері згоряння (у порохових ракетах) або в окремих баках. Сопло — це вихідний отвір для утворених при згорянні пального газів, якому надають форми розтруба.

Ціолковський вивів формулу, що дає змогу розрахувати максимальну швидкість, яку може розвинути ракета. Ця максимально досяжна швидкість в першу чергу залежить, звичайно, від швидкості витікання газів із сопла ракети. А швидкість газів у свою чергу залежить передусім від виду пального і температури газового струменя. Чим вища температура, тим більша швидкість.

Значить, для ракети треба добирати найкалорійніше паливо, яке при згорянні дає найбільшу кількість теплоти.

Але максимальна швидкість ракети залежить не тільки від швидкості витікання газів із сопла. З формули виходить, що вона залежить також від початкової й кінцевої маси ракети, тобто від того, яка частина її ваги припадає на пальне і яка — на некорисні (з точки зору швидкості польоту) конструкції: корпус, механізми керування, рулі і навіть саму камеру згоряння та сопло.

Ця формула Ціолковського є фундаментом, на якому грунтується весь розрахунок сучасних ракет. Відношення загальної, стартової маси літального апарата до його ваги в кінці роботи двигуна (тобто по суті до ваги порожньої ракети) на честь великого вченого назване числом Ціолковського.

Основний висновок з цієї формули полягає в тому, що *в безповітряному просторі ракета розвине тим більшу швидкість, чим більша швидкість витікання газів і чим більше відношення початкової маси ракети до її кінцевої маси, тобто чим більше число Ціолковського.*

Встановивши, що межа швидкості ракети залежить від кількості пального і відношення корисної та «некорисної» маси, Ціолковський дослідив теплотворні можливості порохового пального. Його розрахунки показали, що це пальне не може забезпечити потрібної температури горіння, а значить, і швидкості витікання, необхідних для подолання земного притягання. Крім того, пухкий порох займає великий об'єм, доводиться збільшувати корпус і, отже, кінцеву масу ракети.

Рідке паливо може забезпечити потрібну температуру згоряння. Але для нього потрібні міцні, а значить, важкі баки. Що ж робити? Чи не можна ці баки скинути після того, як вони стануть порожніми?

Ось тут і виникла чудова ідея.

Ціолковський запропонував створити ракету із кількох частин і кількох самостійних ракет. За геніальною думкою вченого, ракетний поїзд, що летить в надхмарні висоти, рухатиметься спочатку за допомогою останньої нижньої ракети. Вона розжене його до певної швидкості і після вигоряння всього палива буде скинута. Потім другий ступінь ще дужче збільшить швидкість і так само відокремиться від ракети. При цьому загальна маса ракети буде поступово зменшуватися.

На перший погляд може здатися, що при такій конструкції вигідно робити якнайбільше ступенів ракети. Але розрахунки переконують, що це не так: максимальна швидкість помітно збільшується до трьох-чотирьох ступенів, а далі майже не зростає. Після шести ступенів швидкість практично лишається постійною.

На багато років випередивши своїх сучасників, великий син російського народу на точній мові математики вперше передбачив шляхи оволодіння людиною космічним простором і вказав реальні шляхи, якими повинна піти техніка міжпланетних сполучень.

Ще в 1911 р. К. Е. Ціолковський виголосив свої віщі слова: «Людство не залишиться вічно на Землі, але, в погоні за світлом і простором, спочатку боязко проникне за межі атмосфери, а потім завоює собі весь навколосонячний простір».

Тепер ми стаємо свідками того, як починає справджуватися велике передбачення.

МІЖКОНТИНЕНТАЛЬНА БАЛІСТИЧНА РАКЕТА

Який вигляд має в загальних рисах сучасна ракета наддалекої дії?

Насамперед це багатоступінчаста ракета. В її головній частині розміщається бойовий заряд. Позад нього — прилади керування, баки і, нарешті, двигун. Залежно від палива стартова (початкова) вага ракети буде в сто-двісті раз перевищувати вагу корисного вантажу! Тому важить вона багато десятків тонн. А в довжину такий літальний апарат досягає двох-трьох десятків метрів — висоти десятиповерхового будинку! Всі ступені ракети поміщають в корпус, якому надають обтічної форми, що потрібно для польоту через атмосферу.

Конструкція ракети повинна відповідати ряду вимог. Наприклад, дуже важливо, щоб сила тяги завжди проходила через центр ваги ракети. В міру згоряння палива центр ваги повинен переміщатися точно по осі симетрії ракети. Якщо не виконати цієї та ще деяких інших умов, то ракета може відхилитися від заданого курсу або навіть почати обертальний рух. «Підправити» курс можна рулями. Доки ракета летить в густому повітрі, можуть працювати аеродинамічні (звичайні літакові) рулі, а в розрідженій атмосфері — запропоновані ще Ціолковським газові рулі, що відхиляють напрям газового струменя.

Тепер конструктори починають відмовлятися від рулів. Справді, на початку польоту густина повітря велика, але ще мала швидкість ракети, і тому повітряні рулі погано «керують». А там, де ракета набуває більшої швидкості, вже мала густина навколишнього повітря. Газові ж рулі крихкі й ламкі, бо їх доводиться робити з графіту або кераміки.

Тому простіше поставити кілька додаткових сопел або повертати сам двигун всередині ракети. Наприклад, на американській ракеті, збудованій за проектом «Авангард», двигун підвішують на шарнірах, і його можна відхиляти в будь-який бік від осі ракети на 5—7°. Автопілот строго стежить за курсом і, як тільки виникає відхилення, виробляє сигнали, які приводять в рух сервомотори — силові пристрої, що повертають двигун таким способом, що його тяга, напрямлена під кутом до осі, повертає ракету на правильний курс.

Кожен ступінь ракети працює в цілком відмінних умовах, які й визначають його будову. Потужність і час роботи кожного дальшого двигуна повинні бути менші, а значить, і конструкція може бути простіша.

Тепер двигуни балістичних ракет працюють переважно на рідкому паливі. Як пальне звичайно застосовують гас, спирт, гідразин, анілін, а як окислювачі — азотну та хлорну кислоти, рідкий кисень та перекис водню.

Дуже активними окислювачами є фтор та рідкий озон, які не знайшли собі поки що застосування через надзвичайну вибухонебезпечність. Є і так звані однокомпонентні палива — суміші пального з окислювачем (переважно різні види пороху).

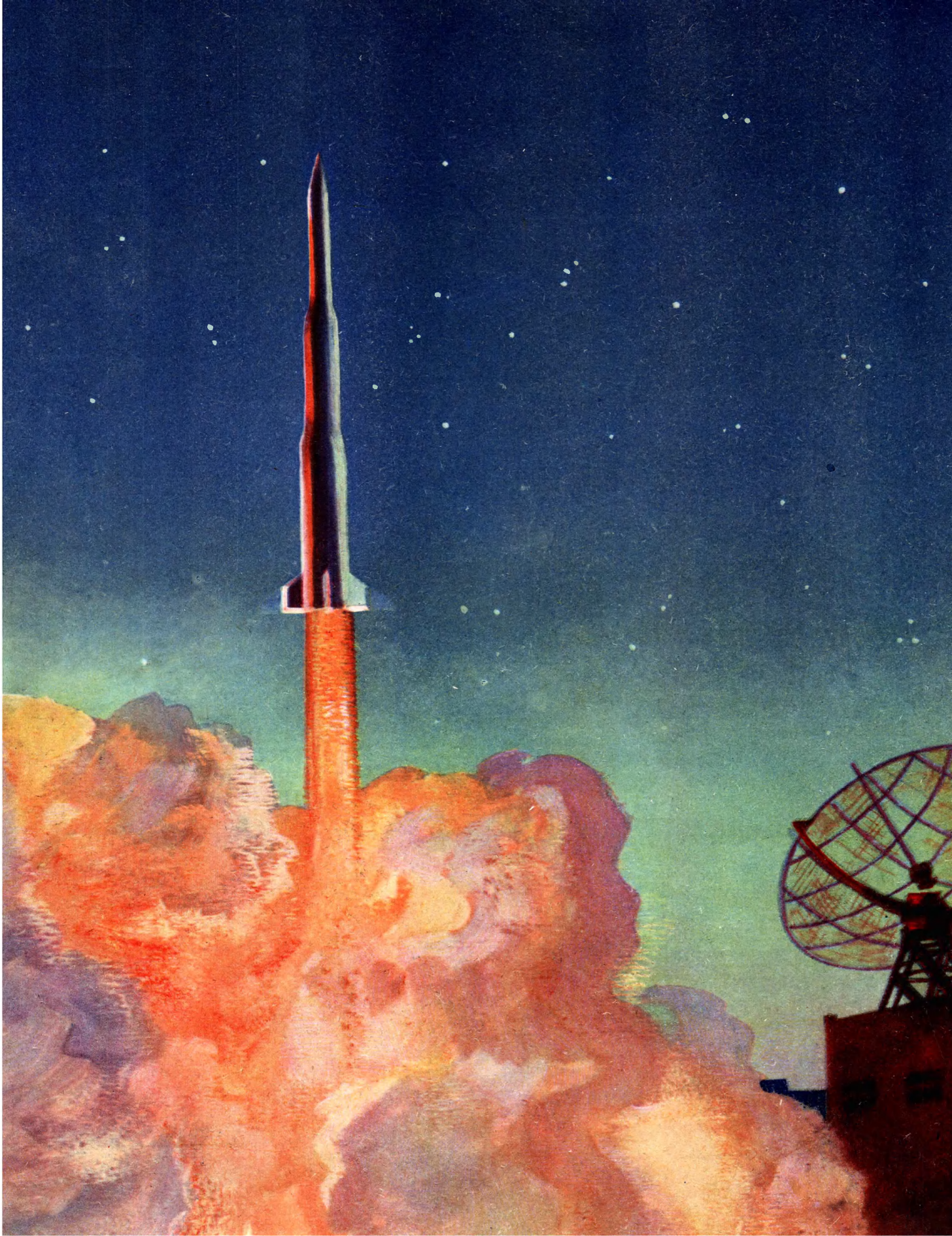
Найвідповідальніша частина ракети — це двигун, а в ньому — камера згоряння та сопло. Тут повинні використовуватися особливо жароміцні матеріали і складні методи охолодження, бо температури згоряння палива доходять до 2500—3500°С. Звичайні матеріали таких температур не витримують.

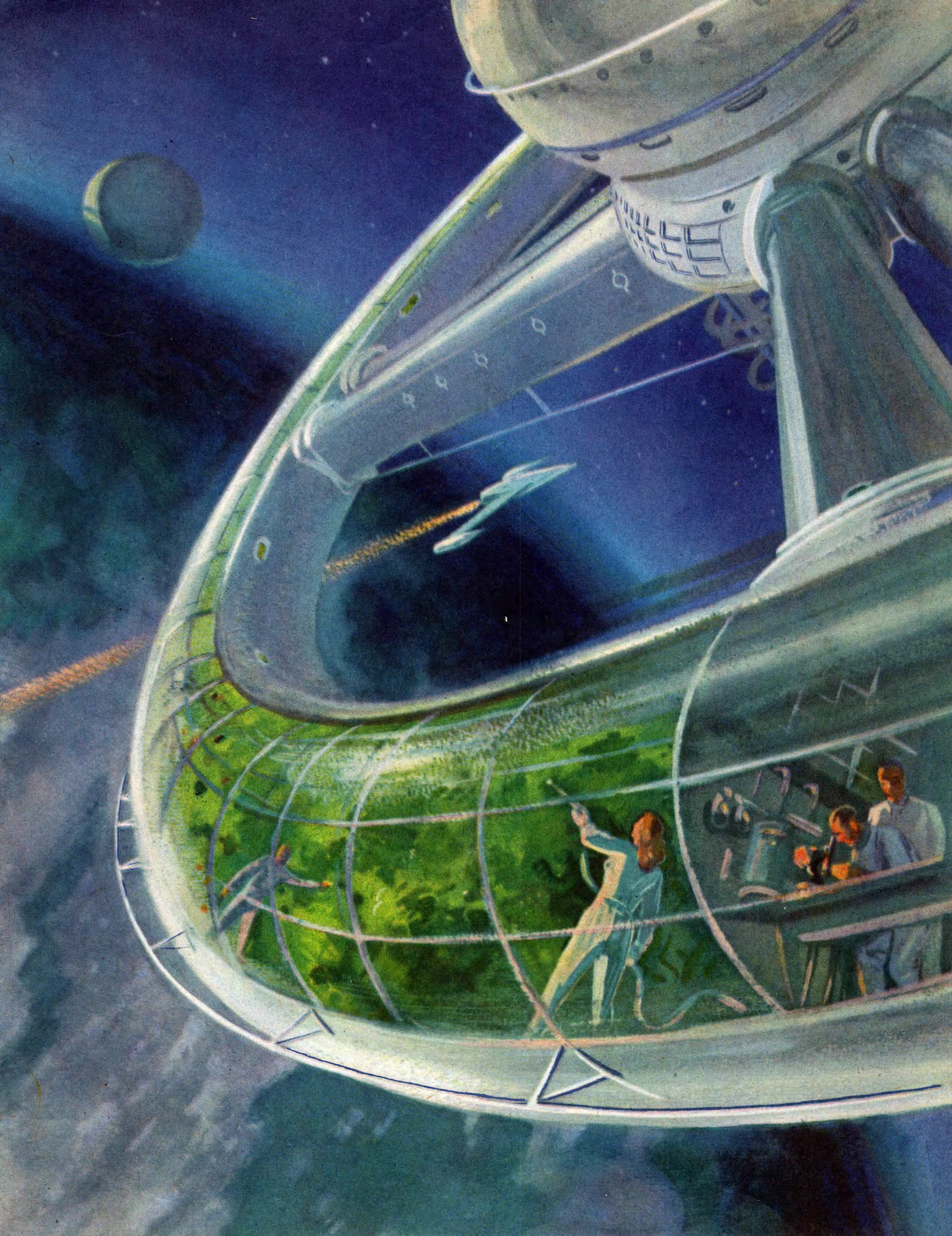
Досить складні й інші агрегати. Наприклад, насоси, які подавали пальне і окислювач до форсунок камери згоряння, уже в ракеті ФАУ-2 були здатні перекачувати 125 *кг* палива за секунду. У ряді випадків замість насосів застосовують балони з стиснутим повітрям або яким-небудь іншим газом, який витісняє пальне з баків і гонить його в камеру згоряння.

Запускається балістична ракета із спеціальної стартової будови. Часто це ажурна металева щогла або навіть башта, коло якої ракету збирають по частинах підіймальними кранами. Площадки на башті розміщаються проти оглядових люків, через які перевіряють та налагоджують складне устаткування. Після налагодження ракету заправляють паливом — і башта від'їжджає. Ракета лишається стояти на «столі» — масивній залізобетонній плиті, в середній частині якої зроблено спеціальний канал для рівномірного відводу газового струменя.

Стартуючи вертикально, ракета потім нахиляється і описує майже точно еліптичну траєкторію. Значна частина траєкторії польоту таких ракет проходить на висотах, більших за 1000 кілометрів над Землею, де опір повітря практично відсутній. Коли ракета наближається до мети, повітряне покривало нашої планети починає різко гальмувати її рух. При цьому дуже нагрівається її оболонка, і, якщо не вжити спеціальних заходів, ракета може

Таблиця 13. Старт багатоступінчастої ракети.





зруйнуватися, а її заряд — передчасно вибухнути.

Високі, буквально астрономічні швидкості польоту роблять удар міжконтинентальної балістичної ракети цілком раптовим і невідворотним.

Як указувалось в повідомленні ТАРС від 27 серпня 1957 р., в СРСР успішно здійснено запуск багатоступінчастої міжконтинентальної ракети. Політ відбувався на величезних висотах, яких не досягав жоден літальний апарат. Пройшовши кілька тисяч кілометрів, ракета попала в заданий район. Одержані результати показали, що такі ракети можна посилати в будь-яку точку земної кулі. Спеціалісти всіх країн відмічали, що радянська ракета не має собі рівних у світі.

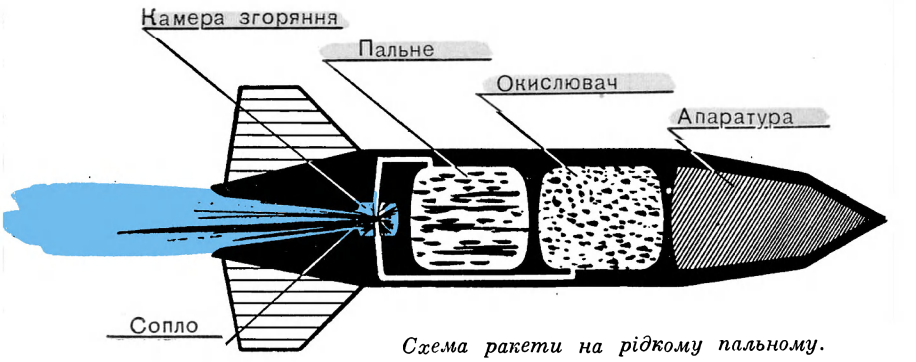


Схема ракети на рідкому пальному.

ДОСЛІДНИЦЬКІ РАКЕТИ

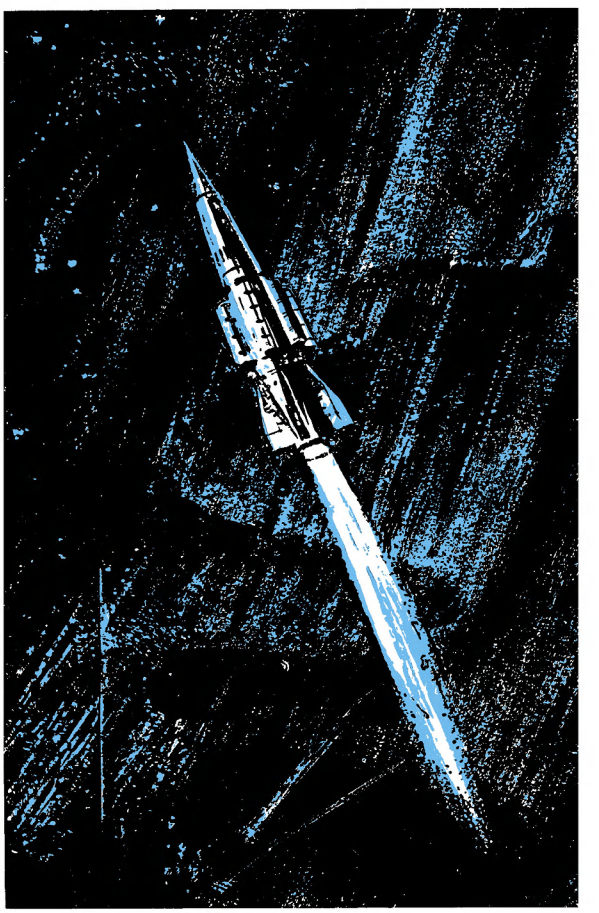
Ще в 20-і роки в нашій країні конструювали ракети для дослідних цілей. Ці роботи завершились пуском у 1933 р. першої радянської дослідної ракети з рідинним ракетним двигуном конструкції М. К. Тихонравова. Після Великої Вітчизняної війни роботи були розгорнуті ще ширше. А з 1949 р. у нас регулярно проводиться дослідження атмосфери спеціально створеними для цієї мети метеорологічними ракетами.

Загальновизнано, що сучасна радянська метеорологічна ракета — краща в світі. На Міжнародній науковій конференції, що відбулася у вересні 1957 р., наша ракета викликала захоплення всіх учених.

Якщо метеорологічним ракетам практично нема чого підійматися вище від 80—90 *км*, бо вони призначені для вивчення шарів атмосфери, що безпосередньо впливають на формування погоди, то для вивчення фізики верхніх шарів атмосфери застосовуються спеціальні дослідницькі ракети.

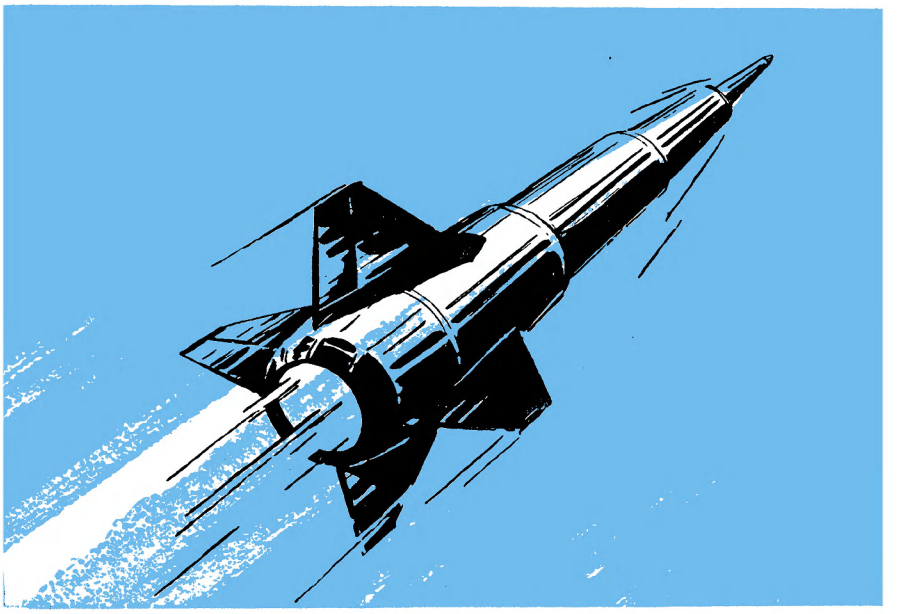
Це більш «солідні» апарати, завдання яких полягає в тому, щоб піднятися якнайвище, дістати дані про всі шари атмосфери і навіть про заатмосферний простір.

На перших ракетах вага науково-дослідної апаратури становила лише 120—130 *кГ*. А ракета, що стартувала в травні 1957 р., несла на своєму борту апаратуру вагою вже в



Радянська дослідницька ракета.

Таблиця 14. Такий вигляд може мати майбутній населений супутник.



Схематичний зовнішній вигляд багатоступінчастої ракети.

2200 *кГ* і піднялася на висоту 212 *км*. 21 лютого 1958 р. потужна радянська дослідна ракета, несучи понад півтори тонни наукової апаратури, досягла висоти 473 *км* і встановила світовий рекорд висоти для одноступінчастих ракет.

На протязі всього польоту, в тому числі й тоді, коли політ відбувався по інерції, ракета стабілізувалась за допомогою спеціальних пристроїв, які не давали їй обертатися. Це значно збільшило точність вимірювань. Результати їх безперервно передавалися по радіо або записувались на магнітофонну плівку і вивчались після спуску контейнерів з апаратурою на Землю.

Велика вантажопідйомність радянських ракет дозволила, крім апаратури, піднімати піддослідних тварин. У таких випадках контейнер з тваринами устатковувався пристроєм для регенерації (відновлення) складу повітря, кіноапаратом і приладами, контролюючими поведінку тварин в повітрі. Першими висотними пасажирами були, як відомо, собаки.

На першому етапі дослідів герметична кабіна з собакою спускалася на парашутах з висот 100—210 *км*. Досліди показали, що прискорення, яке виникає при зльоті ракети, а також при входженні кабіни в густі шари атмосфери під час спуску, легко переноситься тваринами. Також без шкоди переносили вони стан невагомості, який тривав, щоправда, не більше 6 хвилин.

Другий етап досліджень повинен був дати відповідь на складніше питання: чи зможе тварина покинути ракету на більших швидкостях і більших висотах? Це особливо потрібно для повернення тварин, а потім і людини з майбутніх штучних супутників на Землю.

Радянські вчені розробили герметичні кабіни і скафандри із спеціальними автоматичними пристроями, що підтримують необхідний тиск повітря і потрібний вміст кисню. В них тварини викидались, або, як прийнято говорити, катапультувались, з висоти до 110 *км* при швидкості польоту 1—2 *км/сек*, причому катапультування (тобто, по суті, вистрілювання) відбувалось за найскладніших та найнебезпечніших умов: на низхідних траєкторіях і навіть під час безладного падіння ракети.

Дослідження показали, що пристрої для забезпечення безпечного повернення тварин працювали надійно й гарантували благополучне приземлення. Було також відзначено, що навіть у тих тварин, які підіймались у верхні шари атмосфери кілька разів, не вдалось виявити якихось шкідливих наслідків польотів.

Не менш цінні показання приносили з висотних польотів численні фізичні прилади.

Дослідження атмосфери за допомогою ракет потрібні навіть при наявності супутників Землі. Справді, супутник летить, як правило, значно вище 200 *км*, тому шари, що лежать нижче його орбіти, залишаються невивченими. Крім того, ракети дозволяють зробити «висотний розріз атмосфери», тобто провести спостереження в один і той самий час на різних висотах. Ракетні дослідження, штучні супутники, а також вивчення іоносфери за допомогою радіометрів взаємно доповнюють одне одного.

За програмою Міжнародного геофізичного року здійснено велику програму ракетних досліджень. Ракети стартували в Заполяр'ї — з

Землі Франца-Йосифа — та в Антарктиці, де перший запуск було здійснено з борту експедиційного судна «Обь» в районі Мирного. Запускали їх і в середніх широтах. Все це дало можливість зібрати найцінніші відомості про фізичні явища у верхніх шарах атмосфери, зробити цікаві біологічні спостереження.

РАДЯНСЬКІ СУПУТНИКИ ЗЕМЛІ

Звичайно останній ступінь багатоступінчастої ракети становить всього 4—5% її загальної ваги, а супутник повинен бути ще в кілька разів легший. Досить сказати, що коли збільшити його вагу тільки на 1 *кГ*, то ракета повинна була б стати важчою на 200—250 *кГ*.

Тим більш значні та грандіозні досягнення радянських учених та інженерів, що запустили перший супутник вагою 83,6 *кГ*, другий — більше від півтонни, а третій — понад 1300 *кГ*! Легко підрахувати, що вже ракета-носій другого супутника могла б закинути на Місяць тіло в кілька кілограмів.

Вага наших супутників красномовніше за всякі слова говорить про те, що в нашій країні створені вдалої конструкції балістична ракета, потужні і легкі двигуни, знайдено прекрасне паливо і розроблена найточніша система керування. Вага та розміри супутників промовляють і про те, що це не наспіх закинутий на орбіту «кусок металу», як заспокоювали себе деякі американські генерали, а найдосконаліша техніка найпередовішого в світі ракетобудування.

ЩО ДАЛИ НАУЦІ ПЕРШІ ШТУЧНІ СУПУТНИКИ

Усі обсерваторії світу, радіоклуби, тисячі астрономів-аматорів і спеціально створені спостережні пункти проводили безперервні спостереження за супутниками. В СРСР було створено 500 спостережних пунктів більш ніж у 300 точках країни.

За першим супутником у нас стежило 66 оптичних станцій, а при радіоклубах ДТСААФ було організовано 28 спостережних пунктів. У роботу включились і зарубіжні обсерваторії.

Спостереження дали багатющий матеріал, який аналізувався й опрацьовувався найновішими обчислювальними засобами, такими, наприклад, як електронні машини.

Насамперед багато чого стало ясним у такому питанні, як проходження радіохвиль через іоносферу. Приймання сигналів передавачів із супутників численними станціями, розташованими в різних точках Землі, та вимірювання інтенсивності прийманих сигналів дають змогу ніби наскрізь прощупувати іоносферу, визначати її властивості та будову.

Супутники допомогли визначити густину атмосфери й концентрацію заряджених електричних частинок на різних висотах, вивчити ту частину спектра сонячного випромінювання, яка затримується атмосферою, дістати дані про електростатичні та магнітні поля на великій відстані від поверхні Землі. Усі ці відомості дуже важливі для дальшого вивчення фізики Землі, фізики атмосфери, для дослідження причин іоносферних перешкод, для розробки нових методів зв'язку.

Передавачі супутника працювали на хвилях 15 і 7,5 *м*.

На хвилі 7,5 *м* удавалося спостерігати «радіосхід» супутника. Радіосхід не збігається з оптичним «сходом», бо радіохвилі викривляються в іоносфері, і в «радіопроменях» супутник з'являється раніше. А викривлення радіохвиль залежать від концентрації в іоносфері електронів. Тому, знаючи ступінь викривлення, удалось розрахувати зміни електронної концентрації на різних висотах, в тому числі й вище «головного максимуму» іоносфери, що знаходиться на висоті близько 300 *км*. Наземними методами ці дослідження провести не вдавалось.

Особливо важливо, що вдалось виміряти електронну концентрацію у зовнішній частині іоносфери звичайними способами радіозондування; з Землі цього зробити не удавалось. Знати ж це потрібно для повного розуміння взаємодії ультрафіолетового випромінювання Сонця з атмосферою, для вивчення умов поширення радіохвиль, а також властивостей і складу міжзоряного газу.

Розрахунки, які треба було проводити, були надзвичайно складні. Швидке їх завершення стало можливим завдяки тому, що для цієї мети застосовувалась швидкодіюча електронна машина.

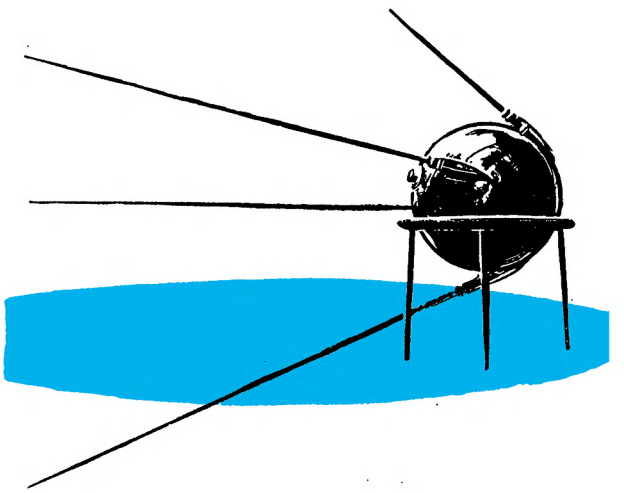
Не менш важливими були й спостереження за супутниками за допомогою зорових апаратів. За їх допомогою визначались елементи орбіти та передбачався рух супутника. З'ясування точної траєкторії дає змогу провести ряд геофізичних досліджень — уточнити форму Землі, ступінь її сплюснутості й т. д.

Справжня траєкторія супутника відрізняється від розрахункової. Це відхилення говорить про нерівномірність поля земного тяжіння, яке в свою чергу визначається розподілом маси всередині нашої планети. Отже, вчені поповнили відомості про земне поле тяжіння і про будову Землі. Щоправда, такі вимірювання вже робили на основі вивчення руху Місяця. Але легкий маленький супутник, що летить на висоті кількох сотень кілометрів над земною поверхнею, «відчуває» земне поле тяжіння незмірно краще, ніж величезний і далекий Місяць.

На кінцевому етапі «життя» супутників, під час їх гальмування в атмосфері, геофізики дістали дуже важливі відомості про густину атмосфери. Цікаво зазначити, що ця величина виявилась в 5—10 раз більшою, ніж передбачалось раніше на основі ракетних спостережень. А обчислення, проведені на підставі спостережень за першим супутником, його ракетою-носієм і другим супутником, практично в усьому збігаються.

Спостереження за рухом супутників і за зміною їх орбіти дають змогу поряд з густиною визначати також температуру верхніх шарів атмосфери. І тут добуті результати були несподіваними: на висотах порядку 225 *км* температура виявилася вищою, ніж це передбачалось на підставі теоретичних міркувань. Внаслідок цього перед фізиками виникла нова наукова проблема: що є джерелом нагрівання верхніх шарів атмосфери?

Не менш цікаві дані одержано при вивченні космічних променів. Це корпускулярне випромінювання — частинки різних енергій, що несуться з Космосу, — дуже поглинається атмосферою, тому вивчення космічних променів з поверхні Землі утруднене. Прилади другого радянського супутника Землі дали з цього приводу найцікавіші відомості.



Перший у світі радянський штучний супутник Землі.

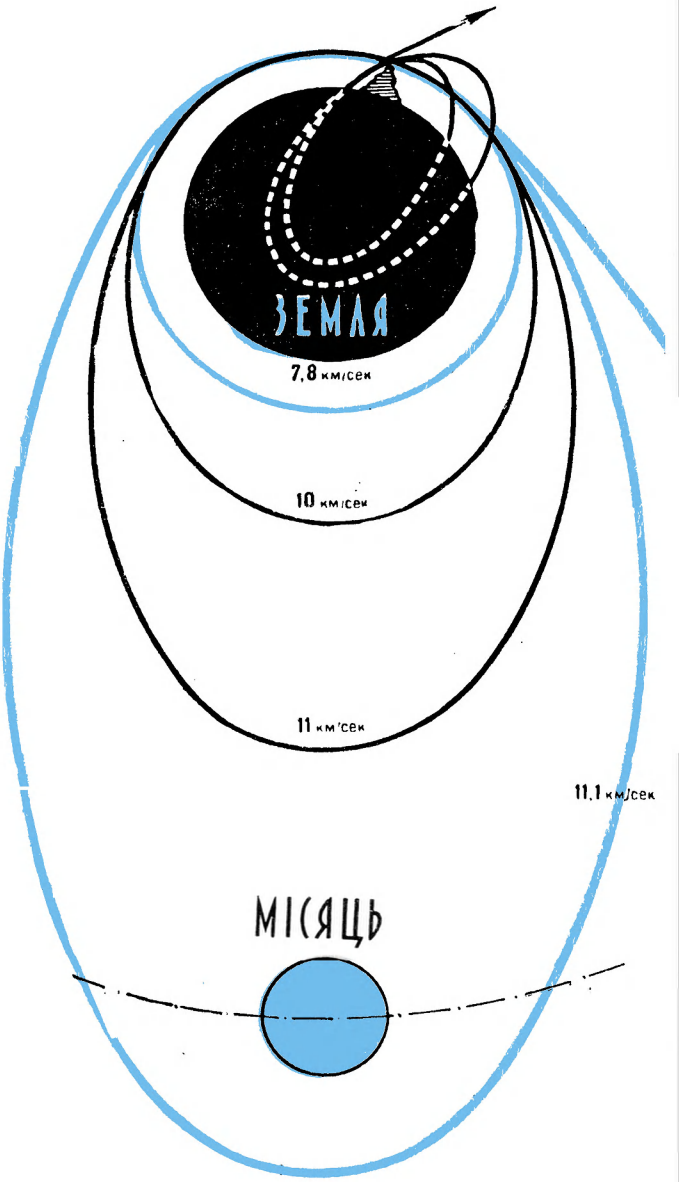
Другий супутник пролітав над Землею на різних висотах, що допомогло вивчити інтенсивність розподілу космічних променів по висоті. Зокрема, фізики уточнили попередні теоретичні уявлення про магнітне поле Землі, бо попередні вимірювання були сугубо «земні», а космічні промені «прощупують» земне магнітне поле на великих висотах.

Особливе становище займають біологічні дослідження, проведені над живою істотою, вперше закинутою в Космос. На другому радянському супутнику був уже живий пасажир — собака Лайка. Багатий матеріал про її життя на супутнику допоміг нашим ученим щільно наблизитися до вивчення природи біологічних явищ, що виникають під час польотів у космічному просторі. Адже тільки на супутнику можна створити умови тривалої невагомості, космічного та ультрафіолетового опромінення. Невагомість удавалося одержувати і на ракетах, але тривалістю всього кілька хвилин. Те саме стосується і до опромінень. Проте необхідно вивчати, як впливає на організм тривале діяння космічних променів. Адже космічні частинки уражають живі тканини не зразу. Існує так званий «прихований період» їх руйнівної роботи, про яку поки що відомо дуже мало.

Хоч життя Лайки на супутнику продовжувалося порівняно довго, будь-якого впливу космічної радіації на життєві функції виявити не вдалось. Значить, в місцях середньої концентрації різкої дії космічні промені не виявляють. Але для докладного вивчення цього питання потрібне ще триваліше й ретельніше дослідження тварин після польоту.

Тривале перебування в стані невагомості також не дало будь-яких хворобливих явищ або порушень нормальної життєдіяльності. І хоч на початку польоту дихання й діяльність серця собаки змінились, через деякий час стан тварини наблизився до такого, який був перед стартом.

Але, мабуть, найважливіше — це те, що тварина впевнено перенесла величезні прискорення, що їх розвивала ракета на ділянці від старту до виходу на орбіту. А їх величина в багато разів перевищувала земне прискорення сили тяжіння, а значить, в стільки ж разів ніби збільшувалася вага Лайки.



Якщо кинути камінь під кутом до горизонту, він завжди впаде на Землю. Тільки пустивши ракету паралельно земній поверхні, можна вивести її на орбіту і зробити супутником Землі.

Найцінніше, що дав перший дослід посилання тварини в Космос, — це, звичайно, сам факт позитивного результату експерименту. Він показав, що умови старту на космічній ракеті живі істоти переносять задовільно.

ЗАКОНИ РУХУ СУПУТНИКІВ

З давніх-давен люди помітили, що кинуте тіло обов'язково повертається на Землю. Кажуть, Ньютон, побачивши падаюче яблуко, вперше замислився над таємницями тяжіння, і саме цей випадок привів його до відкриття закону всесвітнього тяжіння. Випадок з яблуком, можливо, й вигаданий. Напевно, проте, відомо, що, підрахувавши силу земного тяжіння, Ньютон замислився над таким питанням.

Якщо стати на вершину великої гори і кинути камінь, то він, звичайно, упаде вниз. Якщо кинути його сильніше, він упаде далі. А якщо надати йому ще більшої швидкості, то він пролетить відповідно більший шлях. Можна припустити, що кінець кінцем, набувши достатньої швидкості, камінь облетить Землю і повернеться на вершину гори, звідки він почав свій рух. Припустимо далі, що атмосфера не перешкоджає його польоту. Значить, швидкість його за час польоту не зменшиться, і камінь, таким чином, продовжить шлях навколо планети, стане її супутником.

11,2 км/сек

Але якої ж швидкості потрібно надати майбутньому супутнику, щоб зрівноважити силу притягання Землі? Підрахунок за формулою Ньютона нескладний— 7,9 *км/сек* коло поверхні Землі. Ця швидкість називається першою космічною, інакше— колловою швидкістю, бо тіло, що має її, здатне обертатися навколо Землі по коловій орбіті.

Ну, а якщо швидкість руху нашого каменя перевищить 7,9 *км/сек*? Чи зможе він і зовсім подолати притягання Землі? Розрахунки відповідають і на це питання. Послідовне збільшення швидкості тіла приводить до зміни форми його орбіти. Коло перетворюється в еліпс, а еліпс дедалі більше витягується. Якщо швидкість тіла становитиме 11,1 *км/сек*, то воно, роблячи політ навколо Землі, облетить і Місяць — настільки подовшає його орбіта! Але як тільки швидкість польоту збільшиться ще на 0,1 *км/сек*, тіло назавжди залишить Землю. Воно стане повноправним членом сонячної системи, що самостійно обертається навколо Сонця.

Швидкість, при якій тіло здатне подолати притягання Землі, називається другою космічною швидкістю. Довгий час розв'язання такого завдання здавалось просто цікавою теоретичною вправою. Тільки теоре-

тичною. Адже людина не в силі створити двигун, здатний надати тілу такої величезної швидкості. Навіть артилерійський снаряд в момент пострілу летить у кілька разів повільніше.

Але навіть при швидкості 8 *км/сек* тіло може й не стати супутником. Необхідно ще, щоб швидкість тіла в горизонтальному напрямі була не меншою за колову. Саме в горизонтальному, бо, скільки не стріляй (наприклад, вгору з зенітної гармати), снаряд однаково упаде на Землю, навіть якщо його швидкість трохи перевищить колову.

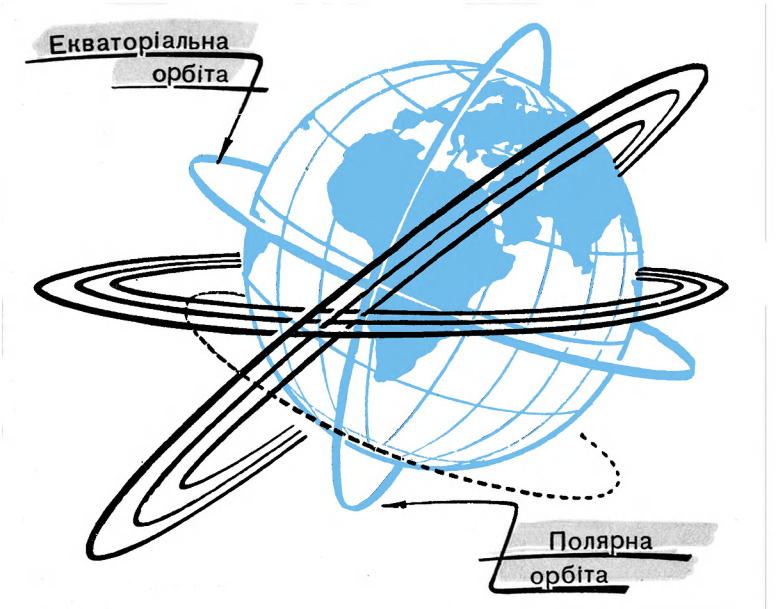
Але щоб майбутній супутник обертався навколо Землі, однієї умови горизонтального запуску не досить. Не можна, наприклад, примусити його літати північним полярним колом, не можна зробити так, щоб він весь час літав на широті Москви, — супутник не може рухатися над будь-якою паралеллю нашої планети (виняток тут — лише нульова паралель — екватор). Як би не запускали штучний місяць, площина, в якій лежить траєкторія його польоту (або площина орбіти, як її звичайно називають), обов'язково повинна проходити через центр Землі. Так само, звичайно, рухається й наш старий знайомий, природний супутник Землі — Місяць. Тому величезне значення має спосіб, яким супутник буде виведений на орбіту.

Ми вже знаємо, що єдиний двигун, здатний розвинути космічну швидкість і вивести супутник за межі атмосфери, — це ракетний. А ракета може вийти на орбіту різними способами: або повільно нарощувати швидкість, або ж, навпаки, розігнатися рвучко, ніби вистрілюючи сама себе. Чим повільніше вона віддаляється від Землі, тим більше діють на неї сили притягання і тим більша частина швидкості поглинається цими силами. Якщо ж розганятися з більшим прискоренням, земне тяжіння діятиме менший час і забере меншу частину швидкості.

Тому далеко не одне й те саме — розганяти ракету на всьому шляху до орбіти або зразу, за кілька десятків секунд, надати їй потрібної швидкості.

Вміст супутника ставить першу межу допустимому прискоренню, точні й крихкі прилади можуть не витримати різкого поштовху. Друга неприємність — наявність на невеликих висотах густих мас повітря. Чим більша швидкість ракети, тим більший опір повітря, тим більше потрібно палива для компенсації втрати швидкості і тим сильніше нагрівається обшивка. Значить, дуже великих прискорень при старті створювати не можна.

Здавалось би, найпростіший спосіб запуску ракети полягає в тому, що її викидають вертикально вгору — до висоти заданої орбіти —і в момент її зупинки в точці нульової швидкості надають їй такої швидкості в горизонтальному напрямі, щоб вона могла обертатися по коловій орбіті. Тоді ракета не впаде на Землю і перетвориться на супутника. Цей метод не потребує особливої точності в швидкості та напрямі розгону, що дуже спрощує систему керування.



Деякі з можливих траєкторій супутників.

Але цей спосіб має й істотні недоліки.

По-перше, втрати швидкості під дією сили ваги далеко більші при вертикальному зльоті, ніж при горизонтальному розгоні. Якщо, наприклад, сила тяги ракети перевищує силу ваги в чотири рази, то втрата швидкості від дії сили ваги становить при вертикальному розгоні 25%, а при горизонтальному лише 3,5%. Таким чином, і цю обставину треба враховувати при запуску супутника.

Крім того, надавати швидкості ракеті доводиться двічі (при підійманні та для горизонтального розгону по орбіті). Таким чином, максимальна швидкість повинна дорівнювати сумі цих двох швидкостей.

На жаль, така сумарна швидкість виходить дуже великою, значно більшою, ніж при інших способах запуску. Тому даний спосіб запуску супутника практично не застосовний.

Найменша сумарна швидкість потрібна в тому разі, коли ракету розганяють по еліпсу, найвіддаленіша точка якого знаходиться на висоті вибраної колової орбіти. Коли ракета досягне цієї точки, лишається тільки надати їй додаткової швидкості, яка в сумі з тією, що вже є, становитиме необхідну колову швидкість.

Трудність цього способу полягає в тому, що ракеті потрібно надати додаткової швидкості саме в той момент, коли вона знаходиться на максимальній відстані від Землі. Для цього потрібна дуже велика точність у величині швидкості на напрямі розгону. Це при зльоті по півеліпсу.

Між цими «крайніми» способами запуску ракети є середнє, компромісне розв'язання. Якщо виводити ракету на орбіту по еліптичній дузі, то потрібна для цього швидкість (а значить, і витрата палива) буде меншою, ніж при вертикальному запуску. Вимоги до системи керування будуть тут дещо суворішими, але однаково значно меншими, ніж при запуску по півеліпсу.

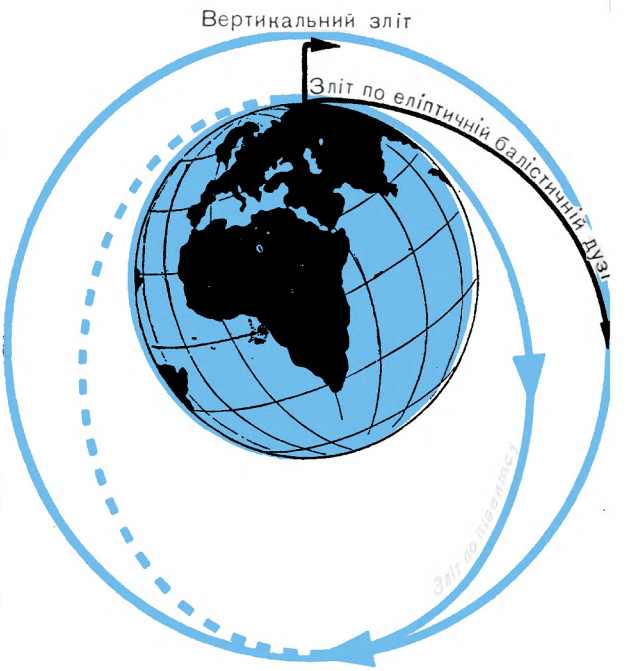
Значить, найвигідніша траєкторія виведення супутника на орбіту — це балістична еліптична дуга. А оскільки ракета багатоступінчаста, то двигун кожного ступеня працюватиме тільки на початку своєї дільниці, розганяючи ракету з максимально допустимим прискоренням.

Тепер розберемося в тому, як же це здійснити. Що треба зробити, щоб майбутній супутник полетів у потрібному напрямі з вибраною нами швидкістю?

Якби не було повітря, то супутник можна було б просто запустити вздовж поверхні Землі так, щоб він тільки не зачіпав високих гір. Але повітря — грізний ворог всіх швидкісних літальних апаратів, від надзвукових літаків до ракет. Щоб не витрачати марно пальне та не боротися з перегрівом обшивки, трасу супутника прокладають там, де опір повітря дуже малий або відсутній зовсім.

Відомості, здобуті дослідними ракетами, допомогли вибрати таку висоту. Уже на висоті 400 *км* густина повітря настільки мала, що точно запущений супутник може «прожити» там не менше року.

Важливо відзначити, що із збільшенням висоти орбіти величина потрібної колової швидкості спадає, бо сила притягання Землі з висо-

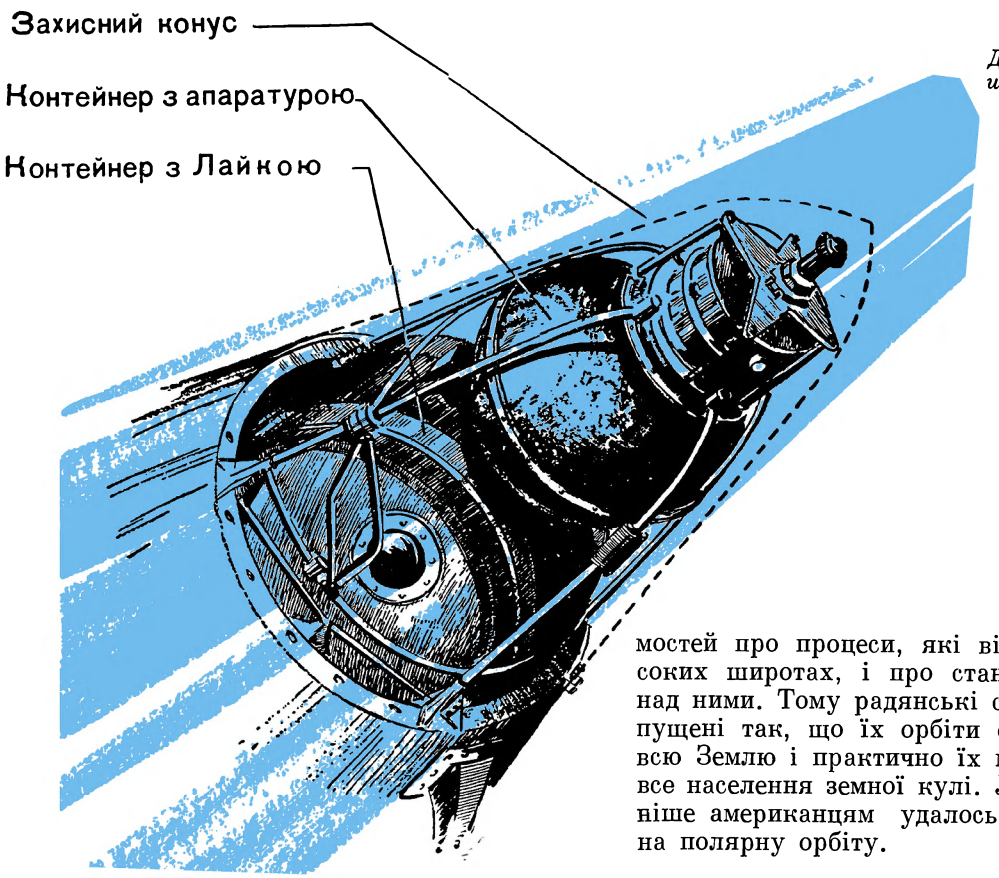


Способи запуску супутників.

тою поступово слабшає. Якщо на рівні Землі вона становить 7912 *м/сек*, то на висоті 200 *км* дорівнює 7791 *м/сек*, а на висоті 400 *км* — 7675 *м/сек*. Якщо так, то треба закида́ти ракету вище, тим більш що там потрібна менша швидкість горизонтального розгону! Але тут ми знов повинні зробити застереження—при збільшенні висоти підіймання значно зростає витрата палива на подолання сили земного тяжіння.

Біда і в тому, що технічні труднощі із збільшенням висоти підіймання зростають колосально, бо значно збільшується витрата пального на подолання сили земного тяжіння. Значить, завдання зводиться до того, щоб при ракеті, яку маємо, закинути супутник якнайвище і там надати йому потрібної горизонтальної швидкості.

Перерахувавши всі особливості запуску супутників, ми не торкнулися однієї досить цікавої обставини. Ми не врахували обертання Землі. Чи буде воно впливати на швидкість ракети? Ні, якщо ми запустимо ракету через полюси вздовж меридіана; але вплив його стане помітним, якщо ракета буде злітати пара-



Другий радянський штучний супутник Землі.

лельно до екватора. Кожна точка земної поверхні на екваторі рухається навколо центра Землі з швидкістю 465 *м/сек*. Якщо ракету запускати за напрямом обертання Землі, ця швидкість цілком додається до швидкості ракети.

Правда, ця швидкість становить трохи більше 5% потрібної колової швидкості, проте все-таки її вигідно використати. Американці, які не мали досить потужної балістичної ракети, запустили свої перші супутники саме таким способом. Для цього вони використали ракетний полігон, що знаходиться порівняно недалеко від екватора, на східному березі Флориди, на мисі Канаверал.

Запустити супутник таким способом, звичайно, легше, але він являє собою меншу цінність для вчених інших держав, бо його можна спостерігати тільки з території країн, що лежать в безпосередній близькості від екватора. В Англії його не бачать зовсім, а в СРСР його видно лише на Кавказі і в Середній Азії, та й то низько над обрієм. Але ще важливіше те, що подібний супутник не дає відомостей про процеси, які відбуваються на високих широтах, і про стан шарів атмосфери над ними. Тому радянські супутники були запущені так, що їх орбіти охоплювали майже всю Землю і практично їх могло спостерігати все населення земної кулі. Лише набагато пізніше американцям удалось вивести супутник на полярну орбіту.

КОНСТРУКЦІЯ І ОСНАЩЕННЯ ПЕРШИХ РАДЯНСЬКИХ СУПУТНИКІВ

Наш первісток був одягнений в «костюм» з алюмінієвих сплавів, легкий і дуже міцний. Роль захисної оболонки супутника виняткова велика. Насамперед вона повинна бути досить міцною — подвійною або навіть потрійною, щоб захистити прилади, що є всередині, від грізного ворога — метеоритів.

Але це не все! Коли супутник освітлюється Сонцем, він дуже нагрівається, а в тіньових сутінках різко охолоджується. Різниця температур при цьому може досягати приблизно 100°. Адже для приладів потрібний нормальний тепловий режим. Це не тільки складне, але й цілком нове завдання. І його розв'язали! Поверхню оболонки супутника обробили таким способом, що вона відбивала основну масу сонячних променів, а в тіні не давала випромінюватися теплоті супутника в простір.

Мало того, для рівномірнішого розподілу теплоти по всьому супутнику його заповнили

азотом. За допомогою спеціальних вентиляційних пристроїв він циркулював між приладами та оболонкою, нагріваючись у тепліших і віддаючи теплоту холоднішим частинам конструкції.

На першому радянському супутнику були встановлені два радіопередавачі досить значної потужності. Звичайні аматорські приймачі впевнено приймали їх сигнали на відстані сотень і навіть тисяч кілометрів.

Але сигнали супутника не лише розповідали про його місцеположення й трасу польоту. Непомітні на слух зміни їх частоти й тривалості повідомляли вчених про процеси, що відбувалися на супутнику, і в першу чергу про величину та коливання температури всередині оболонки. За ті кілька хвилин, що супутник проходив над спостережним пунктом, сигналів досить докладно не вивчиш, і тому їх записували на магнітофонну плівку.

Слід нагадати, що час радіозв'язку з супутником дуже невеликий. Він ненабагато більший від часу візуального, оптичного спостереження. Пояснюється це тим, що поширюються короткі хвилі так само, як і світлові промені. Тому, коли супутник ховається за обрієм, радіоприймання припиняється. Щоправда, і з цього правила є винятки, які залежать від стану іоносфери. Буває, що радіопромінь, заломлюючись або багатократно відбиваючись, проходить величезні відстані.

Складне приладне господарство, особливо система терморегулювання, і два передавачі потребували досить потужних, а значить, і важких джерел живлення.

Батареї гальванічних елементів займають на супутнику значне місце і, очевидно, більшу частину ваги. Це й зрозуміло! Прилади першого супутника повинні були обов'язково працювати хоч би тиждень і подати якнайбільше нових відомостей.

Передавачі значної потужності так само повинні були забезпечити (і забезпечили) впевнений прийом цих повідомлень якнайбільшому числу наукових пунктів.

Приблизно через 20 днів перший супутник замовк — батареї вичерпалися. Розжарюючись під променями Сонця, замерзаючи в тіні, він беззвучно кружляв над Землею, відбиваючи сонячні промені та імпульси радіолокаторів. Проіснувавши ще близько двох з половиною місяців, він згорів у нижніх, густіших шарах атмосфери. Але й тут він виконав певне завдання. Завдяки опору повітря орбіта супутника не лишається коловою — вона стає подібною до спіралі досить складної форми. Вивчення швидкості руху супутника в кожній точці його шляху і визначення форми шляху допоможуть з'ясувати опір атмосфери на різних висотах, залежний від густини повітря, його температури і ряду інших факторів. А вивчення цих параметрів становить одну з найважливіших проблем, розв'язати яку допоміг супутник. Зокрема, знаючи, як і коли він знижувався, учені мали можливість точніше розрахувати строки життя інших супутників.

Ракета-носій, як і слід було чекати, прожила менше від супутника. На кінець листопада вона опустилася в густі шари атмосфери і в перший день грудня 1957 р. припинила своє існування.

Запуск другого радянського супутника відкрив зовсім новий етап розвідки космічного простору: була створена ааатмосферна наукова лабораторія з складною апаратурою та живою істотою — собакою Лайкою.

Знаходячись на висоті багатьох сотень кілометрів, супутник може мати будь-яку форму, тому що він практично не зустрічає опору атмосфери. Тому конструктори не стали створювати для нього окремий корпус і відокремлювати його від ракети. Другий супутник — це сама ракета-носій. Всі прилади були розміщені в носовій частині корпусу останнього ступеня в спеціальних контейнерах — металевих ящиках, укріплених на амортизаторах, які пом'якшують поштовх при старті ракети.

Як видно з рисунка, передня частина ракети несе триповерхову силову раму. На верхньому поверсі укріплено прилад для дослідження короткохвильової ділянки сонячного спектра. Таке розташування дозволяє сонячним променям безперешкодно проникати до приладу.

Нижче, на другому поверсі, встановлено сферичний контейнер. Це по суті копія першого супутника. Правда, потужність передавачів тут значно підвищена, що дало змогу приймати сигнали незалежно від стану іоносфери на відстанях понад 15 тис. *км*, тобто навіть тоді, коли супутник був на другому боці земної кулі!

Величезна вага корисного вантажу (508,3 *кГ*), піднятого ракетою, дозволила помістити на супутнику і контейнер із собакою. Важать вони не так уже й багато. Але живій істоті треба забезпечити підходящу температуру, повітря, харчування й т. д. А для того щоб постачити її всім цим, потрібні складні пристрої.

Системи кондиціонування повітря в герметичних кабінах, застосовувані на підводних

човнах і висотних літаках, виявилися непридатними — надто вже вони важкі та громіздкі. Крім того, треба було налагодити примусову циркуляцію повітря.

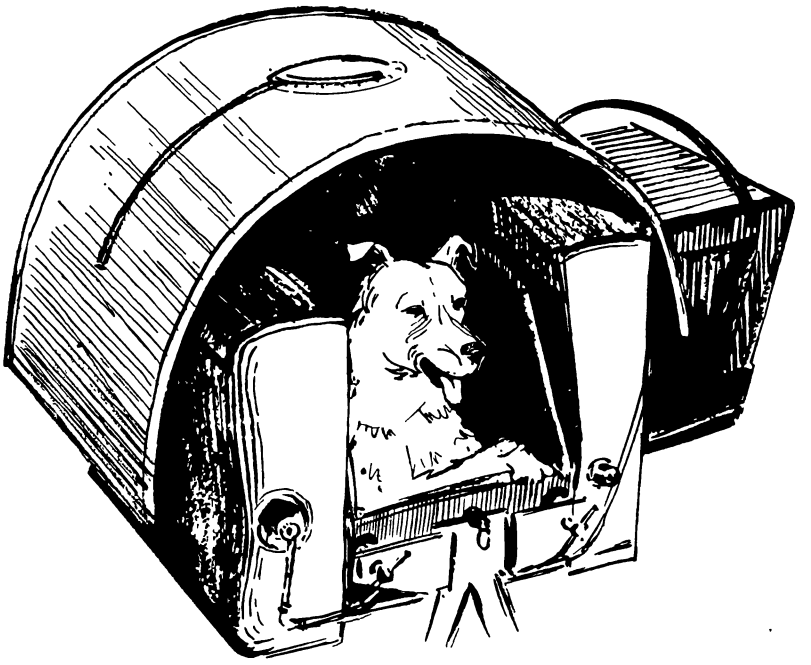
Усі ці завдання були розв'язані за допомогою автоматичних приладів. Вони вчасно «провітрювали» контейнер, перемішували повітря, підтримували нормальну температуру, годували й напували собаку та забезпечували видалення продуктів життєдіяльності тварин. Замість важких балонів з рідким киснем, у контейнер помістили високоактивні хімічні сполуки, які виділяють кисень. Інші хімічні сполуки поглинали надлишок водяної пари, вуглекислоти, аміаку, що утворюються в процесі життєдіяльності тварин.

Таким чином, у кабіні за допомогою особливих пристроїв (системи регенерації) забезпечувався нормальний атмосферний тиск, підтримувався вміст кисню в межах 20—40% та вуглекислого газу не вище 1%. Дані, одержані з супутника по радіо, показали, що кисень виділявся в достатній кількості, а тиск в кабіні не знижувався. Наслідки випробувань в Космосі підтвердили герметичність і надійність першого космічного житла.

А як забезпечити Лайку водою, харчуванням? Адже в ракеті воду не можна налити в блюдце: вона збереться в кулю і буде висіти в повітрі або розтечеться, змочуючи стіни. З резервуара вона сама не виллється, її потрібно видавлювати. Якщо просто покласти перед Лайкою м'ясо, то в умовах польоту супутника цей бажаний шматок буде вільно переміщуватися по всьому контейнеру. Більш того, якщо собака почне стрибати за м'ясом, з «земним» зусиллям відштовхуючись від підлоги, то він може розбитися об стінки або стелю. Адже на супутнику він нічого не важить, а маса його лишається тією самою. Тому рухи Лайки були обмежені, а напували та годували її спеціальні прилади за точним розписом.

У корпусі ракети були розміщені також прилади для вивчення космічних променів та основна частина джерел живлення. Одне лише приміщення для собаки з усіма допоміжними приладами та механізмами споживало значну кількість електроенергії. Але ж, крім того, батареї повинні були живити фізичні вимірювальні прилади та апаратуру телеметрії. Тому потужні передавачі, що витрачали багато енергії, перестали працювати на другому супутнику втричі швидше, ніж на першому.

Прилади, що реєструють космічне випромінювання, дозволили провести дослідження, які іншими засобами неможливо було здійснити,— дослідження космічного випромінювання, так би мовити, в початковому вигляді — до взаємодії з земною атмосферою.



Контейнер з Лайкою.

Розповідаючи про прилади для вимірювання інтенсивності космічних променів, ми весь час називаємо їх частинками. Чи немає тут помилки? Так, є. Але не в слові «частинки», а в слові «промені».

Ще в 1937 р., досліджуючи різні відхилення космічних променів магнітним полем Землі коло полюсів та біля екватора, радянський фізик — член-кореспондент Академії наук СРСР професор С. М. Вєрнов — довів, що космічні промені — це не електромагнітні хвилі, а потік заряджених частинок найрізноманітніших енергій, що набагато перевищують енергії частинок, що їх розганяють в найпотужніших сучасних прискорювачах.

Особливо цінно, що супутник

дозволяє безперервно контролювати зміни кількості частинок на різних широтах і зіставляти ці зміни з процесами, що відбуваються на Сонці, та з станом магнітного поля Землі.

Дуже складні й прилади для вивчення сонячної радіації. Усі бачили, напевно, як безколірний промінь Сонця, пройшовши крізь тригранну призму, розкладається в спектр. Кожному кольору спектра відповідає певна довжина хвилі. Найбільш короткохвильові у видимому спектрі — фіолетові промені, найдовші — червоні.

Але в склад сонячного спектра входять також і невидимі промені. Вони розташовуються за червоною межею (інфрачервоні) і перед фіолетовою (ультрафіолетові). Видима частина сонячного спектра вивчена докладно. Але в земних умовах неможливо вивчити весь спектр електромагнітних коливань. Короткохвильова частина ультрафіолетового випромінювання поглинається озоном на висоті 15—35 *км*. Не вивчені також рентгенівські промені, які випускає Сонце.

Важливість вивчення цієї частини сонячних променів безсумнівна. Саме вони, також як і корпускулярні частинки, що випромінюються Сонцем, виявляють потужний вплив на верхні шари земної атмосфери. Власне, саме вони і створюють іоносферу (див. статтю «Фізичні основи радіо»).

Але інтенсивність цих випромінювань Сонця зазнає сильних змін. Внаслідок цього стан іоносфери весь час змінюється. Тому й потрібні не спотворені земною атмосферою дані про сонячне випромінювання, а одержати їх на поверхні Землі неможливо.

Аналіз сонячних променів звичайно роблять за допомогою фільтрів, що виділяють хвилі певної довжини. Фільтри являють собою пластинки із скла особливого складу. Іноді використовуються органічні або тонкі металеві плівки, нанесені на прозоре скло.

Світлофільтри другого супутника — це пластинки різної товщини з алюмінію, берилію, фтористого літію та поліетилену. Кожен фільтр пропускає промені тільки певної довжини хвилі. Таким чином, весь випромінюваний спектр розбивається на вузькі смужки, що відповідають певним довжинам хвиль. Кожну з них вивчають за допомогою фотоелемента.

З цією метою на другому супутнику були застосовані так звані фотопомножувачі — складні електровакуумні прилади, здатні вловити мізерні кількості променевої енергії. А це якраз і потрібно, тому що загальна енергія цього короткохвильового випромінювання Сонця в десятки тисяч раз менша від енергії сонячних променів видимої частини спектра.

Так вперше в історії науки вчені дістали можливість вивчати весь спектр сонячного випромінювання.

ТЕЛЕМЕТРІЯ

Після запуску другого штучного супутника в коротких повідомленнях ТАРС замелькало слово «телеметрія».

Що це таке? Що означає слово, складене з двох грецьких слів: «теле» — далеко і «метрейн» — вимірювати?

Всі дані, здобуті на супутнику приладами, повинні бути сприйняті та опрацьовані якимись пристроями, пристосованими для передачі по радіо, а на Землі — прийняті й розшифровані, тобто перекладені на зрозумілі людині числові величини.

Отут і з'явилась телеметрія — галузь радіотехніки, що забезпечує вимірювання різних величин на відстані. Перші її пристрої — так звані д а в а ч і. Вони перетворюють кожну вимірювану величину в електричну напругу, яка змінюється слідом за змінами цієї величини.

Що являють собою ці щупальці телеметрії, як, наприклад, вони передадуть биття серця? Серце, очевидно, можна було б прослухати телефоном. Для цього треба тільки прикласти мікрофон телефонної трубки прямо до грудної клітки. Але це дуже громіздкий апарат. Тепер його з успіхом заміняють п'єзоелектричні давачі.

Виявляється, деякі кристали мають цікаві властивості. Якщо певним способом вирізати з них пластинку, то при стискуванні на її краях з'являються електричні заряди. Досить прикласти до кристала металеві контакти і замкнути коло, як проводами потече струм, величина та напруга якого залежать від ступеня стиснення пластинки (докладніше про п'єзоелектрику див. в статті «Звук та ультразвук»).

П'єзоелектричні давачі дуже чутливі і, що особливо важливо, мають малюсінькі розміри. Ось отакий плоский п'єзокристал і можна укріпити в будь-якому місці живого тіла: на грудній клітці, біля кровоносної судини і т. д. Його можна ввести навіть всередину організму.

Не менш прості давачі температури, так звані т е р м о п а р и. Розміром з булавочну

головку, вони помістяться де завгодно — під шкірою собаки чи в оболонці супутника. Термопара — це дві спаяні крупинки різних металів. Залежно від температури спаю в ньому виникає електричний струм різної величини. За допомогою термопари можна дуже точно виміряти температуру.

Отже, давачі створюють напругу, пропорціональну вимірюваним величинам.

Друга ланка телеметричної системи — комутатор-модулятор. Цей пристрій комутує — підключає по черзі всі давачі до модулятора, який в свою чергу, відповідно до величини, одержаної від давача напруги, змінює що-небудь в радіосигналі: частоту сигналу, тривалість імпульсу, його амплітуду або проміжок між імпульсами. Модулятор ніби накладає повідомлення на радіосигнал. Завдяки цьому передавач не просто випромінює хвилю в 7,5 або 15 *м*, а надсилає на Землю радіосигнал, що несе закладену в ньому інформацію.

Вимірювачі температури, пульсу, тиску крові, ритму дихання собаки, а також тиску повітря в контейнері, температури всередині нього, температури зовнішніх стінок і т. д. дають дані порівняно повільно змінюваних рівнів напруги. Значення цих рівнів можна передавати з невеликими перервами, бо за частки секунди вони помітно не змінюються.

Від антени передавача в ефір побіжить радіохвиля, але не безперервна, а така, яка складається з відрізків різної довжини. Пройшовши кілька тисяч кілометрів, ослаблена атмосферою, частина випроміненого переривчастого сигналу попаде на антену наземного приймача. Тут, після підсилення, сигнал надходить на демодулятор. Це дешифратор, який розгадує, розшифровує сигнал. Принцип роботи демодулятора полягає в тому, що він залежно від тривалості імпульсу радіосигналу видає різний рівень напруги.

Значення виміряних і переданих величин записують на фото- або магнітну плівку. Крім того, на плівку наносяться «позначки часу», за якими можна визначити час і тривалість даного вимірювання.

При візуальному спостереженні сигнали подають на осцилоскоп, на екрані якого, як у телевізорі, видно зображення нерівного паркана. Кожен його стовпчик відповідає певному каналу. Різного розміру зелені палички-стовпчики вистроєні в один ряд за номерами своїх каналів. За їх висотою спеціалісти зразу можуть судити про вимірювану величину. Якщо дивитись, наприклад, на стовпчик пульсів, буде видно, як він б'ється, а вершина стовпчика ритму дихання буде повільно ходити вгору та вниз.

Давачі передають важливі відомості не тільки від приладів супутників та дослідних ракет. Вони встановлені і на самих ракетах. Жоден запуск ракети не повинен пропасти даремно для науки. На вивченні досвіду попередніх запусків удосконалюються наступні. Тут потрібні розгалужені телеметричні системи. Робота двигунів, насосів, гіроскопів, системи керування, температура і швидкість газів у соплі та камері згоряння, тиск та температура пального в баках, температура обшивки, моменти включення двигунів та відокремлення ступенів — все перебуває під пильним контролем давачів, передається на Землю, записується та докладно вивчається.

Можна сміливо твердити, що без радіо, телеметрії та електроніки не було б і сучасних ракет!

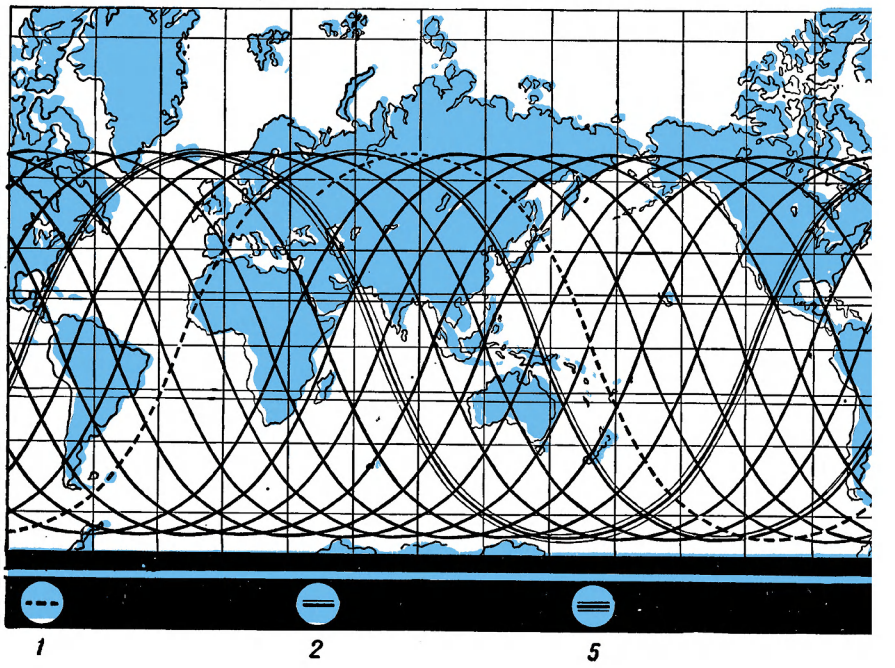
ТРАЄКТОРІЯ ЗАПУСКУ ТА ОРБІТИ РАДЯНСЬКИХ СУПУТНИКІВ

Приблизна картина виведення першого супутника на орбіту така: піднявшись вертикально на декілька кілометрів, ракета почала нахилятися, описуючи задану еліптичну дугу. Система керування поступово нахиляла ракету до горизонту. Під кутом приблизно 45° вона пройшла основну частину атмосфери й піднялась до висоти 60—80 *км*. Двигун першого ступеня був виключений значно нижче і разом з корпусом скинутий вниз. Негайно включився двигун другого ступеня. Швидкість безперервно зростала. Нарешті, відпрацював і виключився двигун передостаннього ступеня, і ракета продовжувала політ по інерції, поки її останній ступінь не досяг найвищої точки. Тут включився її двигун, який і надав супутнику максимальної швидкості.

Після того як виключився двигун останнього ступеня, ракета-носій і прикритий захисним ковпаком штучний місяць стали супутниками Землі. Притиснуті до корпусу останнього ступеня, 4 антени випрямились, включилося електроживлення приладів — супутник ожив.

На висоті декількох сотень кілометрів понеслися в простір, віддаляючись від Землі, три предмети: збоку — частини захисного конуса, попереду — супутник, а за ним — ракета-носій.

Хоч густина повітря на такій висоті дуже мала, але, безладно обертаючись, захисний конус зустрів найбільший опір розріджених частинок атмосфери і швидко відстав. Ракета та супутник декілька днів були майже поруч. Але поступово громіздка ракета-носій також стала відставати, причому, хоч вона й гальмувалась, швидкість її не зменшувалась, а, навпаки, збільшувалась. Чому? Згідно з законом збереження моменту кількості руху, для тіл, що рухаються подібно до нашого супутника, при зменшенні радіуса орбіти швидкість повинна зростати. Чим нижче опускалася ракета-носій, тим більшою повинна була бути її швидкість, щоб вона могла триматися на коловій орбіті. А тому що ракета гальмувалась все-таки дуже повільно, вона, потроху знижуючись, нарощувала свою швидкість. Через тиждень вона обійшла супутник на 1000 *км*, а через 23 дні — уже зробила на один оберт більше. Період її обертання навколо Землі зменшився. Щодня вона знижувалася все швидше, і, як було сказано вище, 1 грудня 1957 р. її політ закінчився.



Траєкторії першого радянського супутника на початку першого тижня польоту.

Перший радянський супутник Землі був запущений по орбіті, площина якої була нахилена до площини екватора під кутом 65°. Такий великий кут нахилу визначив багато цікавих особливостей його руху. Якщо поглянути на розгорнуту карту світу, то зразу впадає в очі, що траса супутника мала вигляд гвинтоподібної лінії й проходила десь між північним і південним полярними колами. Чому так вийшло?

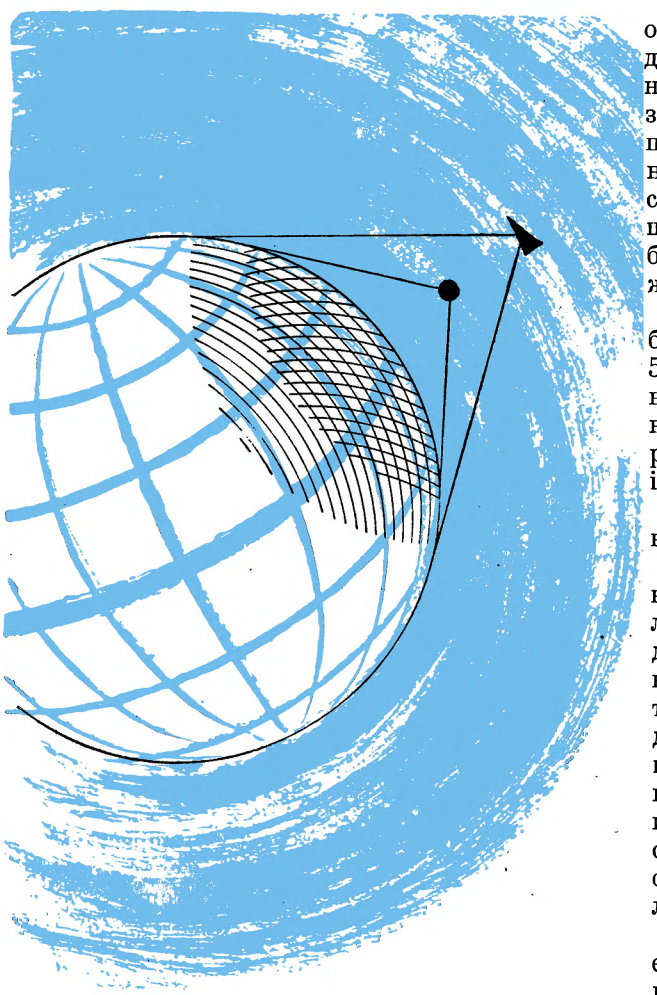
Спочатку, однак, усвідомимо, що орбіта супутника нерухома по відношенню до зірок. На Землю ніби надіто обруч, всередині якого вона обертається і в своєму русі тягне його навкруги Сонця. Кут нахилу цього обруча-орбіти в міжзоряному просторі практично не змінюється.

Отже, супутник обертається по нерухомій орбіті, а Земля обертається всередині неї з заходу на схід, ніби підставляючи свої боки для огляду супутнику.

Візьмемо глобус і уявимо собі, що супутник почав свій політ над Москвою. Спочатку він летів від Москви на північний схід, до північних відрогів Уралу. Потім він «доторкнувся» до 65-ої паралелі і, обігнувши Урал, почав рухатися «вниз» — на південний схід. Пройшовши над сибірською тайгою, космічний гонець Радянської країни вийшов через північ Японії до Тихого океану, спустився до екватора, пересік його, пройшов на сході Нової Зеландії, обігнув крайню точку Південної Америки і знов почав «підійматися» на північ. «Піднявшись» вздовж Південноамериканського суходолу «вгору» до екватора і «доторкнувшись» до західного краю Африки, супутник пролетів над Іспанією та Францією і знов вийшов на широту Москви.

Але Москви «на місці» не виявилося: разом з Землею вона за цей час перемістилась на 1500 *км* на схід. Тому супутник вийшов далі на захід від Москви — під ним лежала Данія. І тільки через 15 обертів супутник знову — через Африку, Італію, Албанію — підійшов з півдня до столиці нашої Батьківщини.

Своє четверте коло супутник завершив над північними берегами Канади, недалеко від Гренландії. А почавши п'яте, він пролетів над Ісландією, пересік Скандінавський п-ів і,



Чим вище летить супутник, тим більше він «бачить».

«зачепивши» Фінляндію, почав наближатися до Москви, але на цей раз з півночі. Це сталося тому, що Москва тепер виявилася під тією частиною орбіти, де супутник, досягнувши верхньої для північної півкулі точки, почав спускатися до південних широт. Таким чином, ми бачимо, що супутник міг пролітати над одним і тим самим пунктом у різних напрямах.

Не дивно також і те, що проекція траєкторії супутника на земну кулю — не пряма лінія. Він проробив цей шлях у вигляді хвилястої лінії. Це результат одночасного обертання Землі та супутника в різних площинах. Але, крім того, і сама орбіта його не лишалась незмінною.

Спочатку наш перший супутник робив один оберт за 1 годину 36,2 хв. Таким чином, за добу він робив трохи менше 15 обертів. Найточнішими вимірюваннями було встановлено, що за кожну добу період обертання першого супутника зменшувався лише на 2,94 сек. Така незначна зміна свідчить, що він знижувався дуже повільно, причому спочатку зменшувалась тільки максимальна висота його орбіти (апогей), а сама орбіта поступово наближалася до колової.

Якби орбіта супутника з самого початку була коловою, то він летів би на висоті 558 *км*. Але орбіта нашого першого супутника була еліптичною, і крайні її точки — найбільшого та найменшого підіймання — розташовувались відповідно на висоті 228 і 950 *км*.

Чому ж перший супутник почав мандрувати по еліпсу?

Згадаймо: щоб супутник почав рух по коловій орбіті, його швидкість в момент відокремлення від ракети-носія повинна точно відповідати коловій швидкості для даної висоти, а напрям руху повинен бути точно горизонтальним. А наш супутник мав дещо більшу швидкість, тому сила притягання Землі не змогла спочатку відхилити його від початкового напряму, і він почав віддалятися від нашої планети. Але щоб остаточно перемогти силу тяжіння, його швидкість була недостатньою, і супутник почав обертатися навколо земної кулі по еліпсу.

Зрозуміло, здобути замість колової орбіти еліптичну дуже вигідно. Адже в даному разі ракета мала в своєму розпорядженні запас швидкості, який дозволив підняти найвищу точку орбіти (апогей) на значну висоту — 950 *км*. Завдяки цьому явищу прилади супутника могли вести дослідження не на одній висоті, а в значній товщі атмосфери.

Найближче перший супутник підходив до Землі в північній півкулі, а в південній він підіймався над нашою планетою на висоту понад 900 *км*. Звідси він «бачив» площу діаметром понад 6000 *км*, а на висоті 300 *км* ця площа зменшувалась майже вдвічі. А якщо супутник «бачив» такий великий простір, то і його можна було розглядати з такої ж великої території. Не дивно тому, що на нашій планеті між полярними колами, де мандрував супутник, через кілька днів не лишилося місця, над яким би він не побував.

За перший тиждень супутник зробив 105 обертів навколо Землі. Він 210 раз пересік

екватор. Значить, точки проходження супутника над екватором знаходились на відстані лише 195 *км* одна від одної, а на високих широтах траєкторії супутника розташовувались ще ближче.

Другий радянський штучний супутник Землі був далеко більший від першого, а його ракета-носій — потужніша: 500 *кГ* корисного вантажу, закинутого на висоту 1670 *км*, говорять самі за себе!..

Значно більша швидкість розгону по орбіті забезпечила йому майже вдвічі більшу висоту підйому. Нагадаємо, що на тих висотах, де розгонилась ракета, щоб стати супутником і літати по коловій орбіті, досить мати швидкість близько 7600 *м/сек*. А другий супутник розвинув швидкість понад 8000 *м/сек*, тобто у нього був дуже значний запас швидкості. Це й зробило еліптичну орбіту другого супутника ще більш витягнутою, ніж у першого.

Велика вісь цього еліпса стала довшою, збільшився час одного оберту супутника, який на початку свого існування обходив Землю вже не за 1 год. 35 хв., а за 1 год. 43,52 хв.

Строк життя другого супутника так само був значно більший, бо більша частина його шляху проходила вище 450—500 *км*, тобто там, де майже зовсім не проявляється опір повітря. І тільки один раз за оберт супутник входив на кілька хвилин в густішу атмосферу.

Найкрасномовніше це підтверджувалось значно повільнішим зменшенням часу обертання навколо Землі другого супутника. Воно становило лише 2,3 сек. на добу, тоді як перший супутник втрачав по 3 сек., а його ракета-носій вже через 37 днів польоту втрачала по 9 сек. за добу.

Орбіта другого супутника так само була нахилена під кутом 65° до площини екватора. Тому характер його шляху над поверхнею Землі не відрізнявся від шляху першого супутника.

ТРЕТІЙ РАДЯНСЬКИЙ СУПУТНИК ЗЕМЛІ

15 травня 1958 р. на орбіту вийшов третій радянський штучний супутник Землі. Довгими роками не зітреться враження, яке він справив на весь світ своєю величезною вагою та численним і різноманітним науковим оснащенням.

Газети всього світу замайоріли яскравими та хвилюючими заголовками: «Гігантський третій супутник на орбіті», «Червоний місяць вагою півтори тонни», «Росія вистрілила гігантським супутником», «Супутник у сто раз більший від нашого»...

Цей новий блискучий тріумф радянської науки й техніки — яскраве свідчення їх незаперечної переваги і насамперед ракетної техніки та радіоелектроніки. Успіхи ці невипадкові. Вони базуються на величезній індустріальній могутності Радянського Союзу й підготовлені всім попереднім розвитком соціалістичного суспільства, його економіки та культури.

Третій радянський супутник Землі—величезне досягнення в розвитку досліджень космічного простору. Це велетенська літаюча лабораторія, поістині «космічний комбайн», як назвав його радянський учений акад. Благонравов А. А.

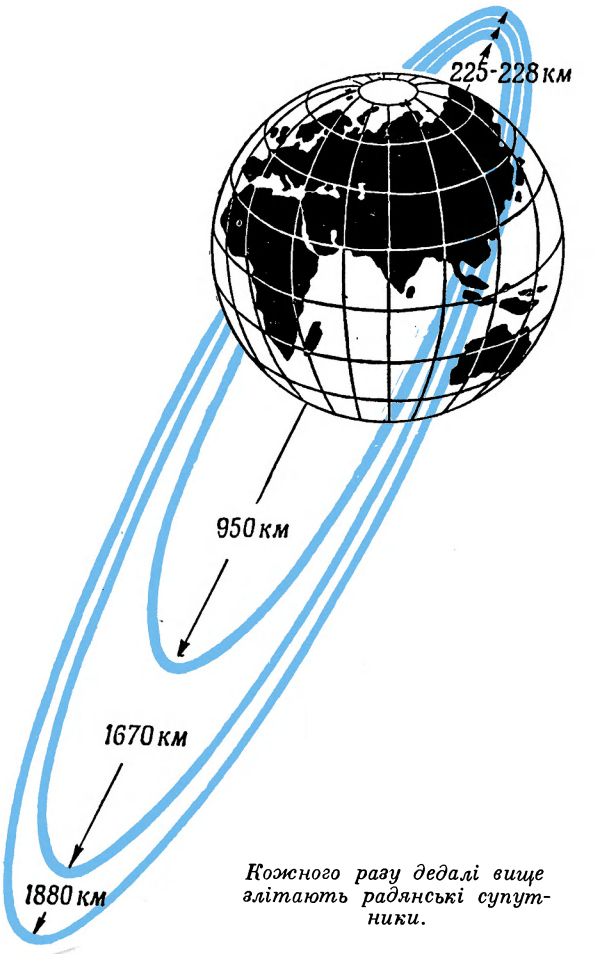
Принципіально третій супутник нічим не відрізняється від своїх перших побратимів. Але з технічної та наукової точок зору — це величезний крок уперед. Перш за все піднято в Космос і виведено на орбіту 1327 *кГ* корисного вантажу! Щоб виразніше собі уявити, що це таке, скажемо, що це вага автомобіля «Волга».

Орбіта його ще більш витягнута та віддалена від поверхні Землі, тобто охоплює ще більшу частину міжпланетного простору. Зразу після запуску вища її точка знаходилась на відстані 1880 *км* над Землею — вдвічі вище, ніж у нашого першого супутника. Вже одне це показує, наскільки зросла могутність радянських балістичних ракет.

Пізно ввечері 31 січня 1958 р., через два місяці після першої спроби і через чотири місяці після запуску першого радянського супутника, з полігона, розташованого на узбережжі Флориди, стартувала американська 30-тонна ракета. Четвертий ступінь її став третім штучним супутником Землі та першим запущеним американцями.

Свій первісток американці назвали «Експлорер» («Дослідник»). Він являв собою тонкий металевий циліндр, подібний до артилерійського снаряда, завдовжки 2 *м*, а діаметром всього 15 *см*. Загальна вага супутника 13,365 *кГ*, вага наукових приладів — 4,5 *кГ*.

«Експлорер» ніс на борту 2 дуже малопотужних радіопередавачі, лічильник Гейгера для реєстрації космічних променів, термопари для вимірювання внутрішньої та зовнішньої температури, п'єзопластинки для реєстрації метеоритів і батареї електроживлення, які



Кожного разу дедалі вище злітають радянські супутники.

повинні були забезпечити двотижневу роботу одного передавача та двомісячну роботу другого.

Запущений незабаром другий американський супутник не міг іти в порівняння навіть із своїм першим побратимом, бо важив лише 1,5 *кГ* і являв собою інтерес в основному для конструкторів ракети «Авангард», які довели кінець кінцем, що ця ракета все-таки може вивести супутник на орбіту.

Третій американський супутник не являв собою нічого оригінального, це точна копія першого. Важив він на 600 *Г* більше від першого американського й майже в 100 раз менше третього радянського супутника.

Досить невеликими були і чотири інших супутники, запущені у Флоріді. Лише восьмий американський супутник мав «відчутну» корисну вагу — 67,5 *кГ*, але й він не перевищив розмірів першого радянського штучного супутника Землі. Тільки в липні 1959 р. американцям удалось вивести на орбіту супутник, що має солідну вагу — 770 *кГ*.

Розміри американських супутників обмежуються, звичайно, потужністю ракет. Цим же пояснюється й той факт, що кут нахилу до екватора площини орбіти перших трьох американських супутників становив лише 35°. Четвертий супутник був запущений під кутом 51°, а п'ятий, «полярний», — перпендикулярно до екватора через полюси Землі.

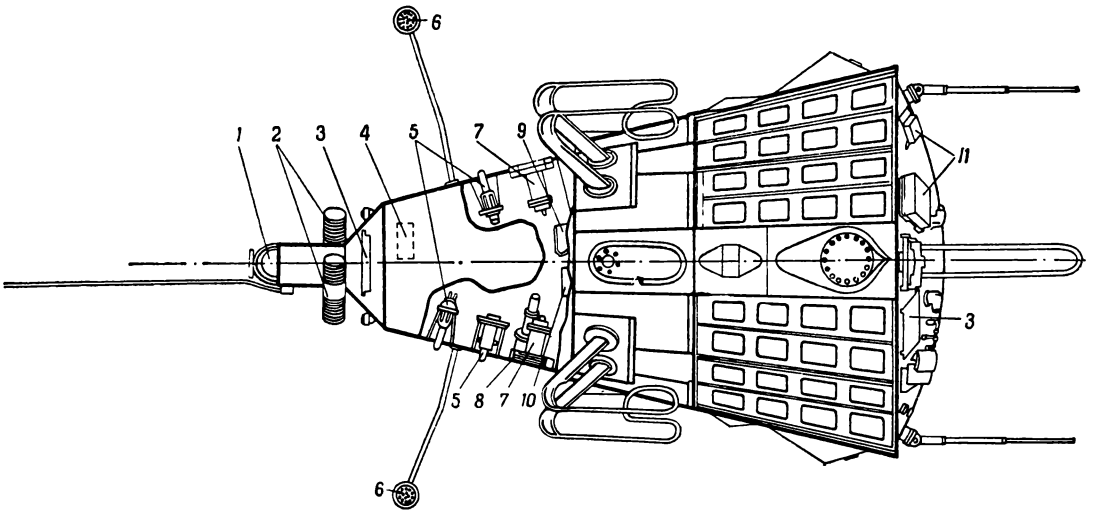
Кожен новий супутник, навіть найменший, до певної міри збагачує науку. Але для фундаментального вивчення космічного простору єдиний радикальний засіб — це штучні супутники великої ваги.

У Москві в павільйоні Академії наук на Виставці досягнень народного господарства СРСР увагу відвідувачів привертає величезний блискучий конус із світлого металу, що розкинув у всі боки щупальця численних приладів і антен. Це третій радянський штучний супутник Землі. Не можна без піднесеного хвилювання дивитись на це найвеличніше творіння людського генію, що сконцентрувало й відбило в собі найвеличніші досягнення науково-технічної думки нашого часу.

Корпус супутника виготовлено з спеціальних алюмінієвих сплавів. Поверхня його відполірована та оброблена таким способом, щоб забезпечити добре відбивання сонячної радіації. Величезний триметровий конус цілком герметизований і заповнений азотом, який перемішується спеціальним приладом і вирівнює температуру всередині. Система терморегулювання значно удосконалена порівняно з системами перших супутників. На нижній частині його бічної поверхні встановлено 16 поворотних секцій-пластин. Їх легко розрізнити на рисунку, бо для збільшення міцності вони проштамповані великими прямокутниками. Секції можуть повертатися й ставати на ребро. Тоді під ними оголюється матова поверхня з меншим коефіцієнтом відбивання, через що супутник дужче нагрівається Сонцем. Кут нахилу секцій регулюється апаратурою залежно від температури всередині корпусу.

Всередині супутника встановлено кілька легких, але міцних, зв'язаних з оболонкою рам. Їх відлито з магнієвих сплавів, вони служать для установки та кріплення численних приладів.

Таблиця 15. Перші космічні мандрівники висадились на Місяці.



Прилади, встановлені на третьому штучному супутникові Землі: 1 — магнітометр; 2 — фотопомножувачі для реєстрації корпускулярного випромінювання Сонця; 3 — сонячні батареї; 4 — прилад для реєстрації фотонів у космічних променях; 5 — магнітний та іонізаційні манометри; 6 — іонні пастки; 7 — електричні флюксметри; 8 — мас-спектрометрична трубка; 9 — прилад для реєстрації важких ядер у космічних променях; 10 — прилад для вимірювання інтенсивності первинного випромінювання; 11 — давачі для реєстрації мікрометеоритів.

У днищі корпусу розташована радіотелеметрична апаратура, радіоапаратура для вимірювання координат супутника, програмно-часовий пристрій, апаратура системи терморегулювання, автомати, що включають та виключають апаратуру, і, нарешті, джерела електроживлення.

На другій приладній рамі, в передній частині корпусу, розміщена основна частина приладів для наукових досліджень разом з своїми джерелами електроживлення. Це радіопередавачі, електронна частина апаратури для різних вимірювань: тиску, іонного складу повітря, концентрації позитивних іонів, напруги магнітного поля та величини електричних зарядів, інтенсивності корпускулярного випромінювання Сонця. Чутливі елементи цих приладів — давачі — розташовані в основному на поверхні супутника. Всередині розміщені тільки деякі давачі температури та лічильники космічних частинок, що мають, як відомо, всепроникаючу здатність. У циліндричних стаканах, приварених до оболонки передньої частини корпусу, встановлено два іонізаційних та один магнітний манометр. Майже за метр від супутника на тонких трубчастих стержнях, шарнірно закріплених на оболонці, підвішено дві порожнисті сітчасті кулі. Це іонні пастки, що вимірюють концентрацію позитивних іонів на трасі руху супутників. Під час старту вони були притиснені до корпусу, і тільки на орбіті під дією пружин стержні повернулись і стали перпендикулярно.

Зовні біля склянок манометрів встановлено два електростатичних флюксметри, що служать для вимірювання електричного заряду та напруженості електростатичного поля. Тут же знаходиться трубка радіочастотного мас-спектрометра, що визначає склад іонів на великих висотах.

Фотопомножувачі, що служать для реєстрації корпускулярного випромінювання Сонця, встановлені біля вершини конуса, а в самому вістрі розміщено магнітометр, бо він повинен бути віддалений від інших приладів і, головне, від великих мас металу, що становлять конструкцію супутника.

На днищі конуса закріплено чотири давачі для реєстрації ударів мікрометеоритів, а також одну з секцій сонячної напівпровідникової батареї. Чотири малі секції встановлено біля носа і ще чотири — на бічних поверхнях. При такому розміщенні енергія безперервно надходить до електроприладів, як би не «повертався» супутник, аби його освітлювало Сонце.

Таблиця 16. Фотонна ракета.

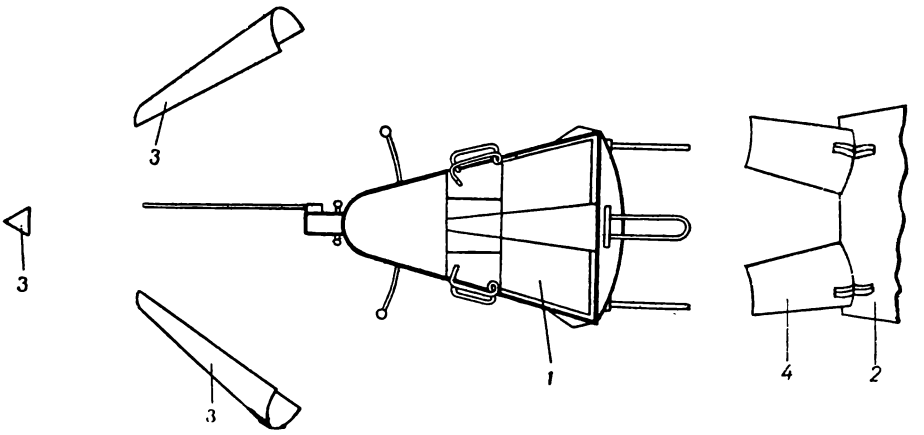


Схема відокремлення супутника від ракети-носія та скидання захисного конуса: 1 — супутник; 2 — ракета-носій; 3 — захисний конус, що відокремлюється; 4 — щитки, що відокремлюються.

Сонячна батарея перетворює енергію сонячних променів безпосередньо в електричну. Пластинки з чистого кремнію, що утворюють напівпровідникові фотоелементи, з'єднуються в батареї. Кожен елемент створює напругу лише 0,5 *в*. Але відповідне з'єднання багатьох елементів дає змогу дістати значні напруги.

На супутнику сонячні батареї пройшли перевірку і випробування на «строк служби», який, між іншим, може бути дуже скорочений мікрометеоритами, що руйнують поверхню кремнієвих елементів.

На всі бóки від корпусу дивляться численні радіоантени у вигляді різних прямих штирів та трубчастих конструкцій складної форми. Потужний передавач на хвилі 15 *м* безперервно випромінює короткі радіосигнали. Його встановлено в основному для того, щоб залучити широкі кола наукової громадськості всього світу до спостережень за супутниками. Систематична реєстрація радіоаматорами його сигналів і особливо запис їх на магнітофонні стрічки мають велике значення. Передачу суто наукових даних здійснює багатоканальна радіотелеметрична система.

Телеметрична система третього супутника може передати за невеликий проміжок часу величезну кількість наукових даних. Це особливо потрібно тому, що велику кількість вимірюваних величин від давачів усіх приладів треба передати за час проходження над радянськими спостережними центрами. З цієї ж причини дані вимірювань, проведених у різних точках орбіти, в тому числі й на другому боці земної кулі, «запам'ятовуються» спеціальними пристроями. А коли супутник проходить над вимірювальною станцією, вони по команді з Землі з великою швидкістю передаються в ефір.

Щоб обчислити координати супутника, використовують електронні лічильні машини. Дані з усіх спостережних пунктів по спеціальних лініях зв'язку передаються в загальний координаційно-обчислювальний центр, де їх автоматично вводять в швидкодіючі лічильні машини, які й обчислюють основні параметри орбіти. Цей складний комплекс електронних і радіотехнічних пристроїв забезпечує швидке й точне визначення координат літаючої лабораторії.

Які ж наукові відомості передавали на Землю телеметричні пристрої третього супутника? По-перше, на ньому проводились безпосередні вимірювання іоносфери: реєструвалась концентрація заряджених частинок і визначалась маса та відносна кількість різних іонів. За цими даними можна зробити висновки про хімічний склад іоносфери.

Вимірюючи концентрацію іонів і спектрів їх мас, потрібно враховувати електричний заряд самої літаючої лабораторії. З цією метою на супутнику використовується два спеціальні прилади — флюксметри. Вони дозволяють, крім заряду супутника, виміряти напругу електростатичного поля поблизу нього.

Проведені одночасно, усі ці вимірювання становлять єдиний комплекс дослідів, що дозволяє значно розширити наші знання про будову іоносфери. З'ясовано, наприклад, що концентрація електронів після певного максимуму спадає повільніше, ніж зростає до нього. Виявилось, що кількість електронів у зовнішній частині іоносфери в 3,6 раза більша, ніж у нижній. Ці ж вимірювання дозволили висловити міркування, що висота границі атмосфери, де вона стикається з міжпланетним газом, лежить на висоті 2—3 тис. *км*.

Вивчення іоносфери має першорядне значення також і для розв'язання проблеми надійного радіозв'язку Землі з дослідними космічними ракетами та супутниками майбутнього.

Завдяки установці магнітометра на третьому супутнику створено виняткові можливості для вивчення магнітного поля Землі. За короткий строк проводиться магнітна зйомка практично всієї земної кулі.

Ці вимірювання особливо цінні тим, що є можливість визначити величину швидких коливань напруженості магнітного поля, джерела яких знаходяться поза Землею, у верхніх шарах атмосфери. Безпосереднє вимірювання картини розподілу магнітного поля Землі на великих висотах дозволить також з'ясувати, чому розподіл магнітного поля великих висот, обчислений за магнітними спостереженнями біля поверхні Землі, не збігається з обчисленнями, проведеними за спостереженнями відхилень космічних променів.

Обертання супутника потребувáло створення спеціального самоорієнтувального магнітометра. Вимірювальний давач його автоматично «дивиться» вздовж лінії магнітного поля, яке б положення не займала вісь супутника відносно Землі. Крім того, ще два давачі за положенням рухомої частини приладу дають змогу визначити положення корпусу і швидкість його обертання навколо власних осей. Це в свою чергу дає можливість оцінити сили, що викликають обертання супутника, і збудувати супутник, який цілком орієнтується в просторі, що потрібно для досконаліших вимірювань і бажано для польоту людей.

Багато уваги на третьому супутнику приділено апаратурі для вивчення природи і походження космічних променів. Існує гіпотеза, згідно з якою в складі космічних променів є фотони високої енергії — випромінювання, споріднене з видимим світлом, але з далеко меншою довжиною хвилі. Називають його гамма-променями. Їх випускають, наприклад, ядра радіоактивних атомів, які розпадаються. Якщо це випромінювання буде знайдене в складі космічних променів, то тим самим буде відкрито новий метод дослідження Всесвіту. Визначити, де народжуються космічні промені, де їх джерело, можна, лише встановивши напрям руху гамма-променів, тому що інші космічні частинки дуже відхиляються в магнітних полях і швидко втрачають свій початковий напрям, в той час як гамма-промені, подібно до світла, поширюються прямолінійно.

Величезне значення має дослідження первинних космічних променів, які ще не зіткнулися з атомами газів земної атмосфери. Адже навіть невеликий шар її дуже змінює їх склад. Цілком, наприклад, поглинаються гамма-промені, а також найважчі частинки із складу космічного випромінювання. Тому, крім лічильника космічних частинок, на супутнику встановлено прилад, що дає змогу визначити склад первинного космічного випромінювання. Відповідь на це питання так само допоможе дізнатись, де і як виникають ці загадкові промені.

Уперше на третьому супутнику вивчалося корпускулярне випромінювання Сонця. Два лічильники корпускул допомогли встановити, як розподіляються ці частинки по окружності Землі, як інтенсивність їх потоків змінюється від висоти і від часу доби. Такі індикатори дозволяють вивчати і рентгенівське випромінювання Сонця.

Крім нових приладів, на третьому супутнику встановлено прилади, які були й на перших двох: для вивчення тиску та густини високих шарів атмосфери, її температури, досліджень умов польоту в космічному просторі, теплового режиму супутника, імовірності його пошкодження метеоритами.

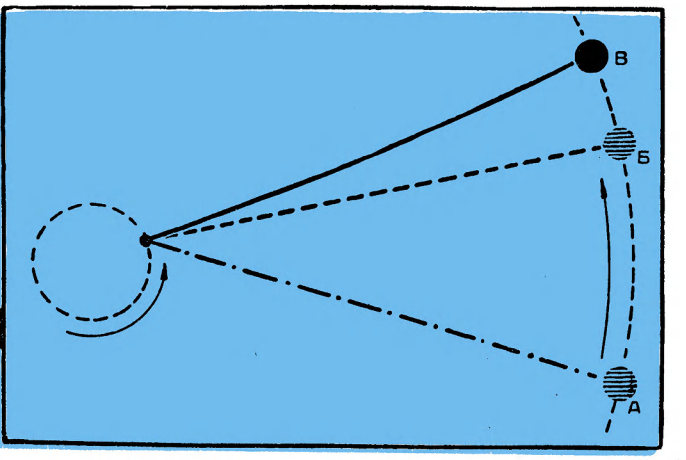
Широка програма досліджень, виконана за допомогою супутника, характеризує його як унікальну космічну лабораторію, рівної якій немає в світі. Перший час після запуску ця космічна лабораторія оберталась навколо Землі близько чотирнадцяти разів за добу, витрачаючи на початку своїх польотів 105,95 хв. на оберт. Площина орбіти її, так само як і перших двох, нахилена до площини земного екватора під кутом 65°. Не можна забути хвилюючого видовища: на фоні зоряного килима, мерехтячи, швидко проходить небосхилом яскрава зірка, створена радянською людиною.

Засоби і методи спостереження за третім супутником значно вдосконалено. Поряд з радіотелескопами-локаторами широко використовуються електронно-оптичні перетворювачі, які дозволяють одержати чітке зображення на величезних відстанях. Значно розширено сітку оптичних спостережних станцій у Радянському Союзі і за рубежем.

Важко переоцінити значення запуску радянської космічної лабораторії, насиченої найскладнішою науковою апаратурою. Вперше такий різносторонній комплекс фізичних приладів піднято за межі земної атмосфери. Учені дістали можливість провести наукові досліди, здійснення яких раніше було принципіально неможливим.

РАДЯНСЬКА КОСМІЧНА РАКЕТА

2 січня 1959 р. наша країна знов здивувала світ новим вражаючим досягненням: у Радянському Союзі була запущена ракета в сторону



Місяця. Запуск космічної ракети — подія всесвітньо-історичного значення—зразу привернув до себе увагу всього людства. Як же відбувалася ця знаменна подія?

Розповідаючи про запуск штучних супутників Землі, ми говорили, що їх ракети-носії злітали вертикально. Коли ракета, пройшовши найгустіші шари атмосфери, досягала висоти 10—15 *км*, спеціальний автоматичний пристрій відхиляв ракету від вертикалі, поступово перетворюючи її траєкторію в еліптичну орбіту. Коли ракета досягала розрахункової висоти та необхідної швидкості, двигун останнього ступеня виключався. Усе останнє робила, так би мовити, вже сила земного тяжіння: вона викривляла траєкторію польоту супутника, перетворюючи її в замкнену криву. При цьому до швидкості ракети ставляться не дуже суворі вимоги. Точніше кажучи, вона не повинна бути меншою від 7,8 *км/сек*, але більшою може бути, причому значно — 8, 9, 10 і навіть 11 *км/сек*.

Чим більша швидкість супутника, тим більше витягнеться його траєкторія, тим більшим стане період обертання, але в іншому все буде без змін — супутник, як і раніше, лишиться супутником, міцно «прив'язаним» до Землі силою тяжіння. Як би далеко не полетів він від Землі (а при швидкості 11 *км/сек* він віддалився б майже на 200 тис. *км*!), він неминуче поверне назад і продовжить свій біг навколо Землі.

Інша справа — космічна ракета. Щоб досягти будь-якого небесного тіла, навіть порівняно недалекого Місяця, ракета повинна обірвати невидимі нитки земного тяжіння, що керують польотом супутників, і пронизати космічний простір, зазнаючи одночасно діяння трьох полів тяжіння — земного, сонячного і місячного. При цьому треба мати на увазі, що дія кожного з цих полів на ракету безперервно змінюється за силою і напрямом. Адже і Земля, і Місяць з великими швидкостями рухаються по своїх орбітах, і їх розташування відносно одне одного та Сонця весь час змінюється.

Сила їх діяння також безперервно змінюється: ракета швидко рухається в просторі і, отже, її відстань до кожного з цих небесних тіл так само весь час змінюється. А сила, за законом всесвітнього тяжіння, залежить від квадрата відстані між тілами.

Щоб краще розібратися в цьому складному питанні, спробуємо уявити собі таку картину. Стрілець, що знаходиться на обертовій каруселі, хоче влучити в мішень, що швидко рухається навколо каруселі. Це важке, майже нездійсниме завдання навіть для дуже вправного стрільця (див. рис. на стор. 340).

Чому це так важко?

Головним чином з двох причин. По-перше, щоб влучити в рухому мішень, треба цілитися не в неї, а в ту точку її траєкторії, де буде мішень у момент влучання кулі. Значить, треба заздалегідь розрахувати, куди пересунеться

мішень за той час, коли куля знаходитиметься в польоті, і націлюватися саме в цю точку.

Але наш стрілець не стоїть нерухомо на одному місці, тому його куля з самого початку набуває подвійного руху: в бік мішені і по колу — під впливом обертання каруселі. Отже, полетить вона не туди, куди націлювався стрілець, а кудись убік, причому величина її відхилення залежатиме від швидкості каруселі. В цьому друга причина особливої трудності наведеного нами прикладу.

Повернемося тепер до нашої космічної ракети. Розрахунок її траєкторії являє собою ще незмірно складніше завдання, ніж наведений вище приклад. Якщо зменшити Землю до розмірів звичайної каруселі, то Місяць став би кулею 2 *м* в діаметрі на відстані 250 *м* від неї.

Наш приклад далеко не відбиває всіх труднощів, що виникають при обчисленні траєкторії космічної ракети.

Справа полягає в тому, що сучасна математика може обчислити будь-який найскладніший рух, який відбувається поблизу земної поверхні. Так, за допомогою диференціального числення можна легко розв'язати наведену нами задачу. Але в світовому просторі діє ще одна категорія сил, що мають вирішальний вплив на політ ракети. Ми маємо на увазі сили всесвітнього тяжіння. Звичайно, і в нашому прикладі куля притягається Землею, але сила ця поблизу земної поверхні стала, і для будь-якої системи зброї заздалегідь відомо, наскільки під її впливом відхилиться вниз точка попадання на тій чи іншій відстані від стрільця.

Зовсім інакше стоїть справа на випадок «пострілу» космічною ракетою. Згідно з законом всесвітнього тяжіння, сила притягання Землі зменшується пропорціонально квадрату відстані між центром Землі та ракетою. Приймемо, що радіус Землі наближено дорівнює 7 тис. *км*. Тоді сила притягання Землі на висоті 27 тис. *км* буде в чотири рази меншою, ніж на висоті 10 тис. *км*, а на відстані 163 тис. *км* від земної поверхні — уже в сто раз меншою. Разом з тим сила притягання Сонця практично не зміниться (адже відстань від Землі до Місяця становить лише 0,25% відстані від Землі до Сонця). Тому відхилення ракети в бік Сонця весь час збільшуватиметься. У цьому легко переконатися, якщо розглянути подану тут схему.

Проте щоб мати повніше уявлення про вплив полів тяжіння на траєкторію космічної ракети, нам треба врахувати ще притягання Місяця. Це ми зробили на поданій схемі.

Звичайно, треба мати на увазі, що на такій схемі не можна точно передати ні відносної відстані від Землі до Сонця й Місяця, ні відносних розмірів цих небесних тіл, ні, що особливо важливо, справжнього співвідношення сил: для цього не вистачило б розмірів не тільки книги, але й цілої кімнати. Адже в деяких випадках сила притягання Сонця буває в 1650 раз більшою від сили притягання Землі! Але навіть і такі наближені схеми дають уявлення про те, як змінюються діючі на ракету сили.

Таким чином, в міру віддалення ракети від Землі сила притягання, що діє на ракету, весь час зменшується, а сила притягання Місяця зростає дедалі більше, зрівноважуючи силу притягання Землі. Нарешті, настає момент, коли сили притягання Землі та Місяця цілком зрівноважують одна одну і ракету відхиляє тільки поле тяжіння Сонця. Така нейтральна точка знаходиться на відстані 35 тис. *км* від поверхні Місяця. (Зазначимо, що ця точка розташована на такій відстані від Місяця тільки в тому разі, якщо ракета летить по прямій, що з'єднує центри Землі і Місяця. У всіх інших випадках вона буде розташована значно далі). Пройшовши цю точку, ракета із зростаючою швидкістю починає падати на Місяць. Такі ті труднощі, які виникають при обчисленні траєкторії космічної ракети, навіть для такої порівняно короткої і простої ділянки сонячної системи, як траса Земля — Місяць.

Поглянемо тепер, як протікав політ космічної ракети.

Пробивши у вертикальному польоті найгустіші шари земної атмосфери, ракета стала поступово відхилятися від вертикалі, виходячи на задану їй траєкторію. Швидкість ракети при цьому прискорено наростала. У кінці ділянки розгону останній ступінь ракети набрав розрахункової швидкості, і автоматична система керування виключила ракетний двигун, після чого сила притягання Землі почала зменшувати цю швидкість. Точніше кажучи, швидкість ракети витрачалася на подолання сили притягання Землі. Уже на висоті 100 000 *км* швидкість ракети зменшилася до 3,5 *км/сек* і продовжувала зменшуватися далі, поки не досягла деякої найменшої величини, після чого знов почала зростати під впливом зростаючого притягання Місяця. Коли ракета перетнула орбіту Місяця, її швидкість становила близько 2,2 *км/сек*.

Через 34 години польоту, 4 січня о 5 год. 59 хв. за московським часом, радянська кос-

мічна ракета, пройшовши 370 тис. *км*, пересікла орбіту Місяця і вийшла у міжпланетний простір, ставши першим штучним супутником Сонця.

Як же рухається нова планета?

Тому що 2 січня Місяць знаходився попереду Землі з внутрішнього боку її орбіти, ракета, обминувши Місяць, деякий час також знаходилась всередині орбіти Землі. Всередині земної орбіти ракета пробула понад два місяці і пройшла близько 900 млн. *км*. Потім вона пересікла земну орбіту і вийшла в простір, розташований між Землею та Марсом.

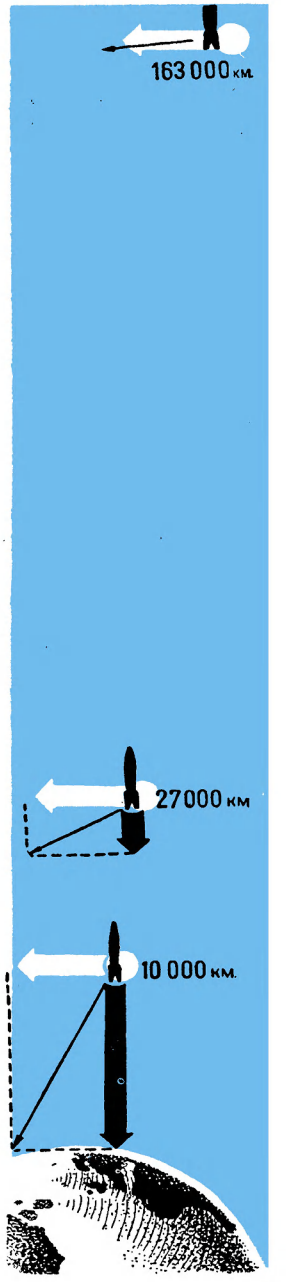
Швидкість руху ракети навколо Сонця становить 32 *км/сек*. Ця швидкість складається з 29,8 *км/сек* (швидкість руху Землі по її орбіті навколо Сонця) і 2,2 *км/сек* (швидкість, яку мала ракета в момент, коли пересікала орбіту Місяця).

Закони небесної механіки дозволяють точно розрахувати рух нової планети і заздалегідь визначити положення її орбіти. Такі розрахунки вже проведено. Площина нової орбіти майже збігається з площиною орбіти Землі. Мінімальна відстань, на яку ракета може наблизитися до Сонця, лише на кілька мільйонів кілометрів менша, ніж середня відстань Землі від Сонця. Але орбіта нової планети не така симетрична відносно Сонця, як орбіта Землі: наближаючись у перигелії (найближчій до Сонця точці орбіти) на 146 млн. *км*, вона в афелії (найдальшій від Сонця точці орбіти) віддаляється на 197 млн. *км*. Цікаво зазначити, що до цієї точки вона дійшла тільки на початку вересня 1959 р.

Маленька штучна планета підходить у чотири рази ближче до Марса, ніж Земля, — до Марса лишається всього 15 млн. *км*. Всього! Погляньте на рисунок: ви зразу побачите, що досить ще трохи витягнути орбіту нашої нової планети — і вона дійде до орбіти Марса... Це означає, що радянські вчені та інженери практично вже тепер можуть забезпечити таку швидкість, яка потрібна для польоту ракети на Марс або Венеру.

На рисунку видно, що орбіти обох планет — Землі великої і «Землі» маленької — пересікаються. Чи означає це, що вони можуть зустрітися?

Нова планета обертається навколо Сонця повільніше, ніж Земля: її рік дорівнює майже 15 місяцям, а не 12, як у Землі. Тому що ракета та Земля рухаються навколо Сонця з різними швидкостями, відстань між ними змінюватиметься, то збільшуючись, то зменшуючись.



На різній висоті сила земного притягання різна.

Спочатку Земля наздожене ракету, потім випередить на чверть і на половину орбіти, а потім знов почне її наздоганяти. У процесі обертання штучної планети і Землі навколо Сонця вони можуть зблизитися на відстань близько мільйона кілометрів, але зустрітися та зіткнутися не можуть. Якби на політ ракети впливало тільки притягання Сонця, то, облетівши навколо нього по еліпсу, ракета повернулась би в ту саму точку, тобто пересікла б орбіту Землі, і їх зустріч була б можливою. Але, оскільки її вже відхилив Місяць, а далі її рух, як кажуть астрономи, зазнаватиме збурення під впливом притягання інших планет, вона вже не зможе повернутися до місця старту.

КОНСТРУКЦІЯ ШТУЧНОГО СУПУТНИКА СОНЦЯ

Радянська космічна ракета була оснащена різноманітною науковою та вимірювальною апаратурою. Крім того, вона мала на борту чотири потужні радіопередавачі. Усі ці прилади та батареї електроживлення розміщені в контейнері кульової форми, встановленому в носовій частині останнього ступеня ракети. Контейнер — оболонка супутника Сонця — виготовлено з алюмінієво-магнієвих сплавів. Ці сплави легші від алюмінію й не поступаються своєю міцністю перед сталлю.

Так само як і апаратура супутників, носовий відсік ракети з розміщеним у ньому кон-

тейнером вкрили спеціальним конусом, який захищав контейнер від нагріву під час руху ракети в нижніх шарах атмосфери. Досягнувши дуже розріджених шарів повітря, пружинний механізм скинув конус; розкрились, розійшовшись у сторони, вуси-антени, які до того були притиснуті до довгої алюмінієвої трубки, що несе на своєму кінці вимірювач магнітного поля.

Але ось закінчилась дільниця розгону ракети; автоматика припинила керування, виключила двигун останнього ступеня і дала команду на відокремлення контейнера від ракети. Спеціальний механізм виштовхнув контейнер уперед. Тому що поштовх був не дуже сильним, контейнер віддалився на порівняно невелику відстань від ракети і, будучи трохи попереду неї, понісся наміченою орбітою.

Куля-контейнер з фізичними приладами, радіоапаратурою і вимпелами, що несуть герб Радянського Союзу, і є, власне, першим штучним супутником Сонця. Він дуже подібний до першого радянського штучного супутника Землі, який так само відділився від ракети-носія.

Для чого ж потрібно було відокремлювати контейнер від ракети?

Це робиться для того, щоб не перешкоджати роботі антен і виключити магнітні впливи металевих конструкцій ракети на покази магнітометра — чутливого приладу, призначеного для вимірювання магнітного поля Місяця.

Вплив полів тяжіння на космічну ракету.

Корпус останнього ступеня ракети міг би стати перешкодою для роботи антени, бо для ультракоротких хвиль (1,6 *м*) він був би свого роду екраном і створював би своєрідну радіотінь. Одночасно зауважимо, що для хвиль короткохвильового діапазону таке явище (екранування) практично не спостерігалось би, бо ці хвилі досить довгі: вони безперешкодно «обігнули» б корпус ракети.

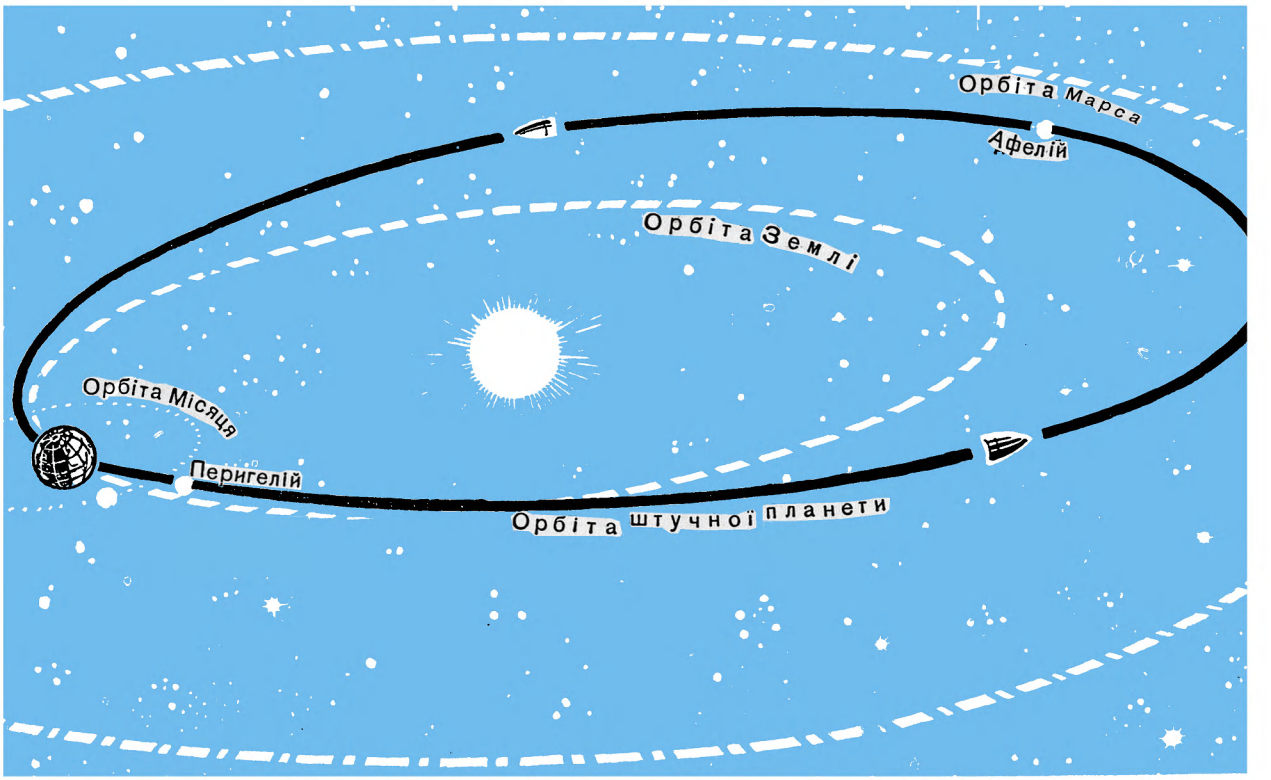
Але контейнер — не тільки панцир, що захищає від мікрометеоритів. Його оболонка охороняє прилади від сильних коливань температури. Якщо не вжити спеціальних заходів, температура освітленого Сонцем і тіньового боків ракети може дуже відрізнятися. Тому необхідно вжити заходів для підтримання нормальної температури, без чого неможливо забезпечити тривалу і безвідказну роботу точних фізичних приладів, розміщених у контейнері. Якщо не відокремити контейнер від ракети, то довелося б регулювати і температуру корпусу всієї ракети.

Система терморегулювання, створена в приладному відсікові радянської космічної ракети, побудована таким способом. Герметична куля-контейнер наповнена газом (азотом) під тиском 1,3 *атм*. Газ безперервно перемішується вентилятором і циркулює між оболонкою й деталями приладів супутника, нагріваючись біля тепліших частин і віддаючи тепло холоднішим частинам конструкції. Крім того, поверхня контейнера оброблена таким способом, що випромінювання нею тепла в простір та ступінь поглинання сонячних променів дозволяють підтримувати всередині «кімнатну» температуру: 20°С.

Отже, навколо Сонця фактично рухаються дві штучні планети: куля-контейнер і космічна ракета-носій, але через незначну різницю в масах їх орбіти будуть дуже мало відрізнятися одна від одної.

ЯКИМИ ПРИЛАДАМИ БУЛА ОСНАЩЕНА КОСМІЧНА РАКЕТА

Крім приладів і електроживлення, в контейнері розміщено два радіопередавачі: один, що працював на хвилі довжиною близько 15 *м* і служив, в основному, для передачі на Землю даних наукових вимірювань, і другий —



Орбіта першого штучного супутника Сонця.

на хвилі довжиною близько 1,6 *м*, який служив разом з приймальними пристроями для радіоконтролю траєкторії руху ракети. Тут же були розташовані прилади для вивчення складу міжпланетного газу. Поряд на приладній рамі встановили апаратуру для вимірювання магнітного поля Землі; «почуваючий» елемент цієї апаратури розташовано в кінці довгої алюмінієвої трубки, укріпленої на оболонці контейнера між антенами.

Крім вимірювальних приладів, у контейнері міститься так званий телеметричний блок, призначений для кодування і передачі по радіо на Землю наслідків наукових вимірювань, а також даних про тиск і температуру всередині та зовні контейнера. Про те, як це робиться, ми докладно розповіли в тій частині статті, де говорили про оснащення штучних супутників Землі.

Але корисний вантаж розміщено не тільки в контейнері. Крім приладів, що забезпечують автоматичне керування останнім ступенем ракети, в її корпусі розміщено частину джерел електроживлення, два радіопередавачі, що працюють на хвилях, мало відмінних одна від одної (довжиною близько 15 *м*), лічильники космічного проміння та апаратура для утворення штучної комети.

ВИВЧЕННЯ МІЖПЛАНЕТНОГО ГАЗУ

Завдяки космічній ракеті вперше стало можливим вивчити склад космічної матерії і міжпланетного газу. Крім молекул газу, у міжпланетному середовищі є величезна кількість частинок, випромінюваних Сонцем. Це ніби сонячний газ, густина якого повинна спадати в міру віддалення від Сонця. Припускають, що в одному кубічному сантиметрі такого газу є близько 1000 частинок — за космічними масштабами густина цього газу дуже велика.

Вивчити міжпланетний газ можна тільки за допомогою космічної ракети. З цією метою на радянській космічній ракеті були встановлені так звані протонні пастки. Кожна така пастка складається з трьох півсферичних електродів. Два зовнішні електроди зроблено з металевої сітки; внутрішній, суцільний, служить колектором, збирачем протонів. На електроди подано такі електричні напруги, що

електричні поля, які утворюються між сітками пастки, забезпечують цілковите збирання всіх протонів. На поверхні контейнера встановлено чотири пастки. Дві з них збирають всі протони, що є в міжпланетному газі, а дві інші вловлюють тільки протони більших енергій, що летять від Сонця в складі корпускулярних потоків.

Чим більше протонів попадає в пастку, тим більший струм потече через її колектор. Струми всіх пасток підсилюються, і величини їх за допомогою радіотелеметричної системи (про яку ми докладно розповіли в розділі, присвяченому штучним супутникам Землі) передаються на Землю.

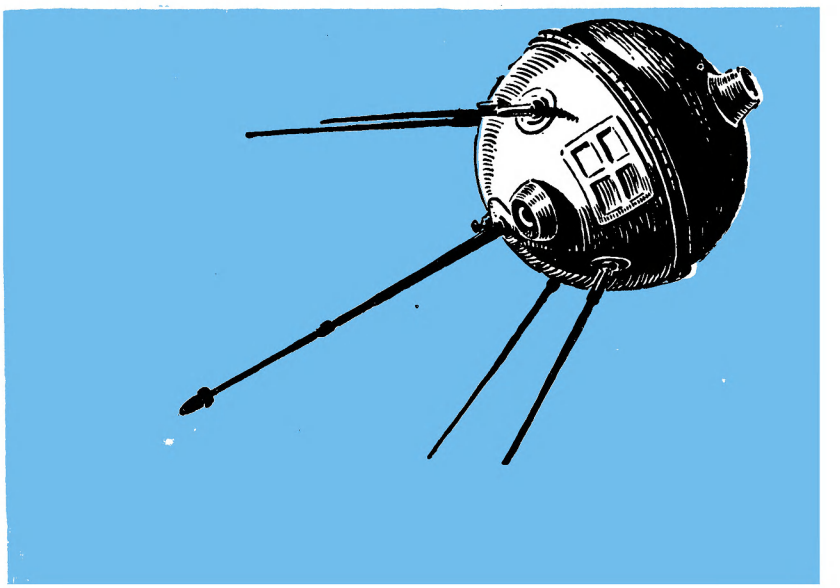
КОСМІЧНЕ ПРОМІННЯ

На радянській космічній ракеті була встановлена численна й різноманітна апаратура для вивчення космічного проміння. Космічні частинки різних енергій реєструвалися лічильниками заряджених частинок і так званими люмінесцентними лічильниками. (Про будову приладів, призначених для дослідження космічного проміння, було розказано вище). Вимірювання, проведені на ракеті, дозволили уявити картину розподілу космічних випромінювань на відстанях, що перевищують 100 тис. *км* від центра Землі.

Виявилося, що поблизу Землі на відстані кількох її радіусів інтенсивність, а значить, небезпека й шкідливість випромінювання в сотні раз більша, ніж у міжпланетному просторі.

І лише починаючи з відстані, більшої від дев'яти радіусів Землі, інтенсивність космічного проміння вже не змінюється.

Апаратура, встановлена на ракеті, дозволила провести і якісний аналіз космічного проміння — визначити енергію частинок. Було встановлено, що енергія частинок, які знаходяться поблизу Землі, порівняно невелика. А інтенсивність частинок на більших відстанях, як ми вже казали, надзвичайно мала — через 1 квадратний сантиметр пролітає лише дві частинки за секунду. Таким чином, відомості, здобуті радянською космічною ракетою, показують, що людям немає підстав боятися променевої хвороби під час польотів до інших планет; щоправда, це справедливо для тих періодів, коли Сонце «спокійне» і не випускає потоків смертоносних випромінювань, які в окремих ділянках простору можуть мати



Перша штучна планета.

значну інтенсивність і бути небезпечними для живих істот.

Учені встановили також, що поблизу Землі є дві зони — внутрішня, в якій панують частинки великих енергій, і зовнішня, заповнена в основному електронами малих енергій. Радянські вчені С. М. Вєрнов і А. І. Лебединський на асамблеї Міжнародного геофізичного року висунули гіпотезу, яка з'ясовує утворення такої хмари космічних частинок близько від Землі. Згідно з їх припущенням, внаслідок взаємодії первинного космічного проміння з атмосферою Землі утворюється вторинне космічне випромінювання, частинки якого захоплюються та утримуються магнітним полем Землі.

Учені вважають, що аналогічні процеси відбуваються і навколо інших небесних тіл, які мають магнітні поля.

МАГНІТНІ ВИМІРЮВАННЯ

Одним із найважливіших видів досліджень, проведених на нашій космічній ракеті, були магнітні вимірювання. Дані про напругу магнітного поля, одержані спеціальним магнітометром, передавалися по радіо на Землю.

На підставі цих даних могли бути з'ясовані закони зміни магнітного поля Землі, а також могло б бути відмічене і магнітне поле Місяця.

Третій радянський штучний супутник дав змогу виміряти магнітне поле Землі в діапазоні висот від 230 до 1880 *км*, а магнітометр радянської космічної ракети проводив такі вимірювання на протязі сотень тисяч кілометрів.

Вимірювання за допомогою супутників і ракет дозволили встановити, що магнітне поле Землі має такий самий розподіл, як поле однорідно намагніченої кулі. В основному воно однорідне, але біля Землі зароджуються і знов зникають ділянки, де спостерігаються невеликі відхилення від закономірного розподілу магнітного поля. Ці місця дістали назву особливих точок. Вчені припускають, що супутники й ракети зустрічають в особливих точках хмари космічних частинок, що мають власне магнітне поле, яке й реєструється магнітометром.

Магнітні поля планет і зірок, а також міжзоряної космічної матерії мають великий вплив на перебіг ряду процесів у навколопланетних та міжзоряних просторах; тому дослідження магнітних полів у Космосі мають дуже велике теоретичне і практичне значення.

МЕТЕОРИТИ

Зустріч з метеоритом загрожує катастрофою майбутнім космічним кораблям і населеним штучним супутникам Землі. Майбутнім астронавтам потрібно знати загальну кількість метеоритів у навколоземному просторі, шляхи їх руху, імовірність зіткнення з ними. У міжпланетному просторі, крім порівняно невеликої кількості небезпечних метеоритів з масою понад 1 *г*, існує величезна кількість метеорної речовини, що складається з твердих частинок, які рухаються з швидкостями від 10—15 до 100 і більше кілометрів на секунду.

Вивчення метеорної речовини вже тепер має величезне значення, бо важливо не тільки оцінити метеорну небезпеку для майбутніх міжпланетних кораблів, але й уміти захистити фізичні прилади сучасних супутників і ракет.

Установлені на третьому радянському супутнику сонячні батареї, «вбираючи» сонячне проміння, приймають на себе удари незчисленних мікрометеоритів.

Безперервне бомбардування дряпає, робить матовою поверхню сонячної батареї. Це перешкоджає проникненню сонячного проміння і кінець кінцем може повністю вивести батареї з ладу.

Така сама небезпека підстерігає оптичні пристрої, які встановлені і встановлюватимуться на космічних об'єктах. Об'єктиви телескопів, кінокамер і телевізійних передавачів дряпатимуться метеоритами, втрачатимуть прозорість або навіть руйнуватимуться.

Для дослідження метеорної речовини на приладному контейнері космічної ракети встановлено два п'єзоелектричні давачі з кристалів фосфату амонію.

У цих приладах використовується так званий п'єзоефект, про який докладно говорилося вище. Механічна енергія частинки, що ударяється, перетворюється в електричну енергію, величина якої залежить від маси і швидкості частинки. При попаданні метеорної частинки в поверхню п'єзодавача на ньому з'являється імпульс, який подається на підсилювач. Після підсилювача імпульси за величиною розподіляються на три «сорти». Про число імпульсів кожного «сорту» радіотелеметрична система негайно повідомляє на Землю.

Таким чином вимірюється не тільки загальна кількість частинок, що зіткнулися з даним давачем, але визначається і їх ваговий склад.

Наукова апаратура, встановлена на борту радянської космічної ракети, функціонувала нормально на протязі всього шляху від Землі до Місяця.

Дані наукових спостережень передавалися по радіо безперервно на протязі 62 год. Навіть попередній аналіз вимірювань показав, що результати цих досліджень мають величезне наукове значення.

ЯК СПОСТЕРІГАЛИ ЗА ПОЛЬОТОМ РАКЕТИ І ПІДТРИМУВАЛИ З НЕЮ РАДІОЗВ'ЯЗОК

Від моменту старту аж до виходу ракети на орбіту навколо Сонця численні оптичні, радіо- і радіолокаційні установки спостерігали та контролювали її політ і приймали від неї наукову інформацію. Щоб «піймати» ракету, яка летить з швидкістю метеора, в об'єктив телескопа або точно спрямувати на неї антену радіолокаційного телескопа, треба знати, де й коли вона пролітатиме.

Розв'язати це завдання було далеко не легкою справою. Вздовж траси польоту ракети на території Радянського Союзу були встановлені спеціальні радіолокаційні станції. Вони автоматично стежили за ракетою і безперервно передавали її координати на вимірювальні і спостережні установки, за допомогою яких проводилось точне вимірювання швидкості та місцеположення ракети на першому етапі її польоту.

Безперервні вимірювання цих величин автоматично передавались по спеціальних лініях радіозв'язку на тисячі кілометрів і надходили в обчислювальний центр. Тут вся вимірювальна інформація автоматично вводилась в електронні лічильні машини, які обчислювали орбіту майбутньої планети з урахуванням спільного переміщення ракети, Місяця, Землі і Сонця.

Усі дані вимірювальних станцій «прив'язувались», як кажуть астрономи, до астрономічного часу з точністю до кількох тисячних частин секунди. З цією метою була створена спеціальна система єдиного часу, сигнали якої передавались по радіо одночасно з сигналами, що несли інформацію; тому завжди було відомо, коли проведено те або інше вимірювання.

Коли ракета віддалилася на таку відстань, що радіолокатори вже не могли автоматично «супроводжувати» її, контроль орбіти відбувався за допомогою радіотехнічної системи, що працювала на хвилі 1,6 *м*.

Застосування короткохвильової апаратури пояснюється тим, що на цих хвилях можуть вести прийом радіолокаційні телескопи, за допомогою яких можна точно визначити напрям, за яким прийшов сигнал, а значить, і напрям на ракету. Цього не можна зробити, приймаючи сигнали інших передавачів ракети, що працюють на хвилях довжиною близько 15 *м*.

По сигналу з Землі в точно визначений час на ракеті включався передавач; потужні радіолокаційні телескопи приймали його випромінювання і визначали напрям на ракету. Дані цих вимірювань також передавались по радіолініях до обчислювального центру. Спільна обробка цих вимірювань і одержаних раніше даних від радіолокаційних систем дозволяла уточнити майбутню орбіту і безпосередньо контролювати рух ракети.

Потужні передавачі, великі розміри антени та високочутливі приймачі дали змогу стежити за ракетою на відстані до півмільйона кілометрів.

Але цим не вичерпується роль радіо на штучному супутнику Сонця. Крім визначення траєкторії польоту, радіозасоби забезпечували роботу системи телеметрії: радіохвилі несли на собі унікальні дані про наукові вимірювання в Космосі. Два передавачі, розміщені в корпусі ракети, передавали дані про космічне проміння, а третій передавач у контейнері забезпечував передачу основної наукової інформації.

Для більшої зручності оптичних спостережень і фотографування ракети була створена штучна «комета»: ракета випустила газову хмару, яка світилася.

Що таке комети взагалі? Учені вважають, що комети являють собою скупчення холодних каменів та пилу, яке розігрівається, проходячи поблизу Сонця. При цьому вони виділяють гази, які мають здатність світитися в промінні Сонця.

Маса газів, що викликають світіння комети, надзвичайно мала. Світіння маси газу в 1 *кг* можна помітити на відстані 100 тис. *км*.

Для створення штучної комети, або, вірніше, її хвоста, що світиться, найбільш підхожою речовиною виявився натрій. Його газова хмара є джерелом сліпуче яскравого світла: при масі пари натрію в 1 *кг* потужність випромінювання хмари становить близько 7 тис. *квт*. Такий світильник можна спостерігати з Землі

в безмісячну ніч на відстані 100 тис. *км* і не тільки в телескопи, але й звичайним оком. Щоправда, це джерело світла недовговічне: за одну-дві хвилини хмара в безповітряному просторі розшириться, яскравість її зменшиться і спостерігати її буде неможливо. Але цих двох хвилин для спостереження штучного космічного тіла було досить.

На відстані 113 тис. *км* від Землі встановлений на ракеті спеціальний випарник за допомогою запаленого терміту за кілька десятків секунд випарував кілограм натрію; утворилася хмара розміром з добру сотню кілометрів. 3 січня о 3 год. 56 хв. 20 сек. за московським часом перша штучна комета спалахнула в сузір'ї Діви. Натрієву хмару бачили багато астрономів світу. Зокрема, вона була сфотографована за допомогою спеціально створених оптичних пристроїв на астрономічній станції поблизу Кисловодська, розташованій на висоті 2130 *м* над рівнем моря. Цей унікальний фотознімок дав змогу уточнити орбіту ракети та підтвердив, що її рух відбувався відповідно до попередніх розрахунків.

Тепер ще рано підбивати підсумки наукових спостережень, здійснених за допомогою радянської космічної ракети. Магнітна плівка, на яку записані дані всіх цих спостережень, має багато десятків кілометрів довжини, і їх розшифровка та вивчення заберуть багато часу. Але вже тепер ясно одне: створена руками радянських людей космічна ракета стала першим механізмом, який розірвав кайдани земного тяжіння і вирвався у безмежну далечінь Всесвіту.

3 березня 1959 р., після неодноразових невдалих спроб, вирвалась у Космос і американська космічна ракета, так само запущена в сторону Місяця. Американська ракета пройшла в десять раз далі від Місяця, ніж радянська, і, подолавши земне тяжіння, вийшла на власну навколосонячну орбіту. Тепер уже два космічні тіла, створені руками людини, стали штучними супутниками Сонця.

ЗЕМЛЯ — МІСЯЦЬ

12 вересня 1959 р. в нашій країні була запущена в сторону Місяця друга космічна ракета. За конструкцією вона була схожа на свою попередницю, запущену 2 січня, і несла на борту таку саму наукову та радіотехнічну апаратуру. Крім того, у приладному контейнері ракети знаходився вимпел із зображенням герба Радянського Союзу, який треба було доставити на Місяць як пам'ятник великому подвигу радянського народу, що проклав людству шлях у Космос.

Вимпел, поміщений на першій космічній ракеті.

У попередньому розділі статті ми розповіли про те, які великі труднощі постають перед ученими при обчисленні траєкторії ракети навіть на такій короткій (за космічними масштабами) ділянці, як траса Земля — Місяць. Адже тоді ракета повинна була потрапити тільки в район Місяця, а не на самий Місяць!

Щоб скласти собі уявлення про ступінь точності, яку треба було витримати при запуску цієї ракети, досить навести кілька цифр. Так, помилка в швидкості ракети лише на 1 *м/сек*, тобто на 0,01% від величини повної швидкості, приводить до відхилення точки зустрічі з Місяцем на 250 *км*. Відхилення вектора швидкості від розрахункового напряму на одну кутову мінуту викликає зміщення точки зустрічі на 200 *км*. Істотно впливає на положення точки зустрічі ракети з поверхнею Місяця також зміна координат місця виключення двигуна. Настільки ж важливо точно витримати і заданий час старту: запізнення на 10 сек. приведе до відхилення точки зустрічі на 200 *км*.

Та обставина, що радянська космічна ракета успішно досягла поверхні Місяця, переконливо свідчить про те, що наша країна має не тільки найпотужніші в світі ракети, але й найдосконалішу систему автоматичного керування та контролю.

Незважаючи на те, що з моменту запуску другої космічної ракети пройшло ще зовсім небагато часу, вже можна підбити перші підсумки проведених за її допомогою наукових досліджень.

Найважливішим з них є встановлення того факту, що Місяць не створює навколо себе магнітного поля. Це вказує на те, що він не має ядра, подібного до ядра Землі. Так само не виявлено і пояса радіації навколо Місяця, що цілком збігається з результатами магнітних вимірювань. Крім цього, на шляху проходження ракети були проведені вимірювання загального потоку космічного випромінювання, одержано нові дані про рентгенівське проміння, гамма-промені, мікрометеорити, а також виконано цілий ряд інших досліджень.

Розрахунки радянських учених та інженерів виявились цілком точними: 14 вересня о 00 год. 02 хв. 24 сек. приладний контейнер другої радянської космічної ракети торкнувся поверхні Місяця! Вперше за всю історію створений руками людини механізм досяг іншого небесного тіла.

Не встигла звістка про цю історичну подію як слід дійти до свідомості людей, як наша наука знов вразила світ новим дивовижним досягненням: 4 жовтня 1959 року, в день другої річниці запуску першого радянського штучного супутника Землі, у Радянському Союзі була запущена третя космічна ракета. На цей раз її спрямували таким способом, що, обігнувши Місяць, вона повернулась в район Землі. На борту ракети знаходилась автоматична міжпланетна станція, яка відокремилась від останнього ступеня ракети в момент виключення двигуна.

Установлена на автоматичній станції фототелевізійна апаратура сфотографувала й передала на Землю фотографію невидимого нам боку Місяця.

ПРОБЛЕМИ МАЙБУТНЬОГО

Для створення населених супутників Землі потрібно розв'язати багато найрізноманітніших проблем. Адже персонал міжпланетної лабораторії повинен буде довгий час жити, тобто дихати, їсти, рухатись, працювати у незвичних, неприродних умовах. Найбільш неприродним на перший погляд здається необхідність існування при величезних швидкостях.

Ми нормально почуваємо себе в поїзді, що мчить швидко, і навіть на літаку ТУ-104, який розвиває швидкість близько 1000 *км/год*. Чи не означає це, що й на супутнику, який має швидкість близько 30 тис. *км/год*, людина почуватиме себе так само? Виявляється, в цьому відношенні немає підстав для занепокоєння: швидкість не страшна людському організмові.

Згадаймо, що ми обертаємось разом із Землею, а кожна точка на екваторі рухається з швидкістю 1700 *км/год* — набагато швидше, ніж ТУ-104! Сама Земля з швидкістю 108 тис. *км/год* мчить по своїй орбіті навколо Сонця, а вся сонячна система щогодини пролітає в світовому просторі 900 тис. *км*. Але ж ми нічого цього навіть не помічаємо!

Страшна не швидкість, страшне прискорення. Саме воно викликає таке збільшення навантаження на людський організм, що його робота може бути катастрофічно порушена. Найнеприємніший наслідок навіть порівняно невеликого прискорення (на випадок прямолінійного руху) — це відлив крові від тих частин організму, які повернуті в бік руху ракети. Він може спричинитися до тривалої непритомності і навіть до загибелі організму. Такі ж наслідки може мати зміщення внутрішніх органів людини, що виникає від дії прискорення. Тому для ракети з живими пасажирами прискорення не повинно бути дуже великим.

Інакше кажучи, розгонити ракету потрібно повільно, а коли орбітальна швидкість буде досягнута і двигуни припинять роботу, людина зразу ж перестане відчувати рух. На нещастя, вона перестане відчувати й свою вагу. Адже ніщо не буде притискувати пасажирів до підлоги космічного корабля. Те, що ми називаємо вагою, зникне зовсім.

Як же людина переноситиме стан невагомості?

На різних людей втрата ваги діє по-різному. Успішне перебування в світі без ваги дуже залежить від тренування. Але, у всякім разі, вже твердо встановлено, що короткочасний стан невагомості для більшості людей нешкідливий. Учені вважали, що відсутність ваги не викличе істотних розладів в організмі, аби не підвела нервова система.

Це й було доведено під час польоту навколо Землі 12 квітня 1961 р. першого в світі радянського льотчика-космонавта Ю. О. Гагаріна на борту космічного корабля-супутника «Восток» і під час польоту 6 — 7 серпня

1961 р. другого радянського льотчика-космонавта Г. С. Титова на борту космічного корабля-супутника «Восток-2», який зробив 17 обертів навколо Землі.

Перші в історії людства польоти в космічний простір дали змогу зробити висновок про практичну можливість польотів людини в Космос. Польоти показали, що людина може нормально переносити умови космічного польоту, виведення на орбіту і повернення на поверхню Землі. Цими польотами показано, що в умовах невагомості людина повністю зберігає працездатність, координацію рухів, ясність мислення, може приймати їжу і воду.

Дуже цікава проблема харчування на космічних кораблях. Здавалось би, що́ може бути простішим, ніж пообідати, поснідати, повечеряти? Але в незвичних умовах невагомості все змінюється. Якщо легко відкусити «космічний» бутерброд, то не так просто випити чаю або молока. Рідина, якщо її вилити у відкриту посудину, зразу ж збереться в кулю й буде висіти в повітрі або розтечеться по кабіні, змочуючи стіни, підлогу та стелю.

Щоб зварити обід, каструлю треба буде щільно закрити кришкою, бо інакше вміст каструлі, згорнувшись у кулю, перекочує на стіну або стелю. Очевидно, каструлю доведеться ставити в спеціальну центрифугу та швидко обертати, щоб її вміст притискувався до стінок.

Якщо астронавт, стомлений від такого складного поводження з рідинами, захоче трохи відпочити та викурити цигарку, то й це йому не вдасться. Сірник ще запалиться, але цигарка не горітиме. Справа в тому, що гарячі газоподібні продукти згоряння тут не будуть легшими від навколишнього повітря і не підійматься вгору. Скупчуючись біля цигарки, вони перешкоджатимуть доступу кисню, потрібного для підтримання горіння, й цигарка погасне.

З тієї ж причини вентилятори повинні будуть безперервно перемішувати повітря в кабіні, бо вуглекислота, яку ми видихаємо, залишиться тут же коло рота, і можна задихнутися, якщо сидіти або стояти на одному місці.

Як бачимо, життя в умовах невагомості не обіцяє великих зручностей. Але завжди є вихід! Можна, наприклад, створити на супутнику штучну вагу. Спосіб простий. Напевне, кожен робив такий дослід — крутив відкрите відерце з водою, і вода при цьому не виливалася. Справа в тому, що відцентрова сила, яка виникає при обертанні, притискує воду до дна відерця. Подібно до цього матиме свою вагу й будь-який предмет, що перебуває на борту супутника, якщо останній буде обертатися навколо своєї осі. Зауважимо зразу, що ця штучна вага залежатиме від швидкості обертання.

Найімовірнішою конструкцією населеного супутника Землі вважають велике порожнисте кільце, трохи подібне на величезне автомобільне колесо. Звичайно, таке колесо-лабораторію не доставиш в Космос на буксирі. Воно буде доставлене «на небо» частинами й зібране «на місці». В ньому розміститься численні служби, лабораторії, житла. Те, що ми називаємо підлогою, знаходитиметься на зовнішньому боці кільця, а «стеля» — з боку осі. Якщо розмір колеса буде не дуже великий, людям доведеться стояти під невеликим кутом одне до одного, зате всі речі стануть вагомими, предмети знов падатимуть на підлогу, а вода виливатиметься з пляшок.

Обертати супутник-колесо неважко, досить буде лише підштовхнути його невеликою ракетою.

Але в «позаземному» житті космонавтів підстерігатиме й серйозна небезпека. Працюючи поза супутником, можна легко від нього відштовхнутися, але щоб підлетіти до нього назад, відштовхуватися буде вже ні від чого! Тому доведеться або прив'язуватися канатом, або брати з собою реактивний пістолет. Якщо притиснути такий пістолет до себе і вистрілити, то сила віддачі відкине стрільця в протилежний бік.

А що являтиме собою космічний скафандр? Звичайно, він матиме мало спільного із скафандрами для висотних польотів. Справа в тому, що космічний скафандр, крім створення нормального середовища для дихання, повинен ще забезпечити в заатмосферному просторі потрібну для людини температуру, а головне — захистити її від діяння космічних променів, космічного пилу та мікрометеоритів. Скафандр із м'якої тканини надметься, як м'яч, і в ньому важко буде рухатися. Тому космічний скафандр буде, очевидно, більше нагадувати металеву зброю рицарів. Для захисту від метеоритів доведеться, можливо, використати багатошарові покриття.

Неймовірно складний політ у міжпланетному просторі. Навіть тепер, коли перші штучні супутники Землі і Сонця, можна сказати, вже проклали туди шлях, багато найскладніших проблем стоїть перед працюючими у

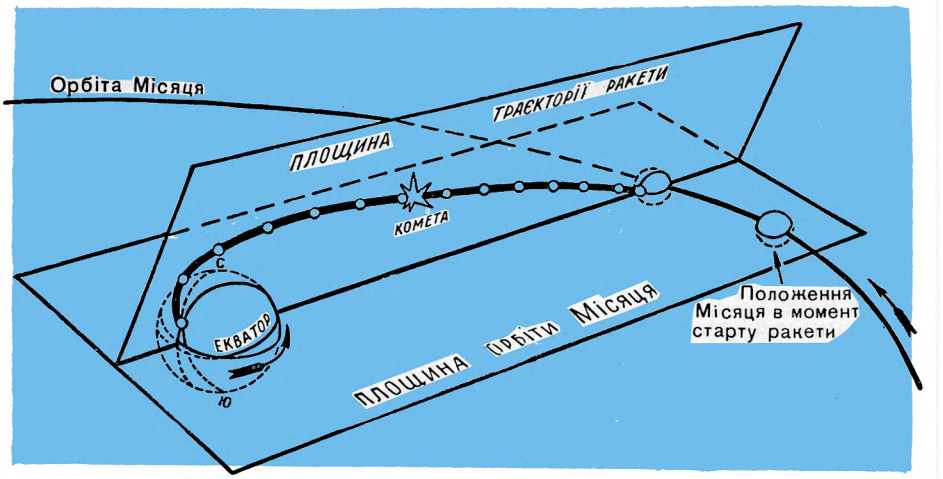


Схема траєкторії польоту другої радянської космічної ракети.

ції галузі вченими та інженерами. Одна з основних проблем — це захист від шкідливих випромінювань Космосу. Атмосфера Землі надійною бронею захищає нас від ультрафіолетових і рентгенівських променів Сонця та від більшої частини космічних променів. Але сховатися за атмосферою не може навіть супутник, що летить зовсім низько.

Проте від ультрафіолетових і навіть рентгенівських променів захищатися порівняно просто. Їх затримує навіть тонка металева стінка космічного корабля. А от від космічних променів надійного захисту поки що нема.

Можна було б покрити супутник свинцевою оболонкою. Шар свинцю в 2—3 *см* затримає до 35% космічних променів. Але створення броні з такого важкого металу вимагатиме величезної додаткової витрати палива при запуску супутника з Землі. Тому вчені посилюють шукання в інших напрямах.

І ще одна серйозна неприємність, яка чекає майбутніх космічних мандрівників, — метеорити. Радикальних засобів захисту від них поки що так само немає. Правда, імовірність попадання метеорита в космічний корабель незначна. Це наочніше від усього підтвердило життя двох перших радянських супутників. Вони кілька разів проходили крізь метеорні потоки, але істотних пошкоджень не діставали. Тим часом зіткнення навіть з невеликим метеоритом (що має діаметр 2—3 *мм* і важить частини грама) викличе руйнування герметичної оболонки супутника і, можливо, загибель його екіпажу. Адже удар найкрихітнішого метеорита (що має величезну швидкість — кілька десятків кілометрів на секунду) викликає вибух, подібний до вибуху артилерійського снаряда. Внаслідок цього оболонка не тільки зруйнується, але і всередині супутника виникне потужна ударна хвиля, яка розплющить геть усе на своєму шляху.

Це, без сумніву, грізна небезпека, але й тут люди зуміли знайти досить простий вихід. Справа в тому, що метеорит у момент удару миттю випаровується і руйнування спричиняє вже не він сам, а динамічна ударна хвиля, яка виникає внаслідок його удару. Проведені дослідн показали, що навіть залізний метеорит в більшості випадків не може пробити шар металу, товщий, ніж його діаметр. Тому якщо на відстані 20—30 *см* від герметичної оболонки супутника зробити ще одну (вже не герметичну) оболонку, наприклад, з алюмінієвих листів 2—3 *мм* завтовшки, то абсолютна більшість метеоритів, які мають діаметр, менший від 2—3 *мм*, «загине» в цій зовнішній оболонці. Навіть якщо який-небудь метеорит і проб'є її наскрізь, то й це не призведе до катастрофіч-

них наслідків — адже між внутрішньою та зовнішньою оболонками супутника немає повітря, і, отже, ударній хвилі просто ні в чому утворитися. Якщо ж до того врахувати, що з загальної кількості метеоритів, які досягають поверхні Землі, залізних всього 25%, а більшість метеорних частинок являє собою, очевидно, малюсінькі згустки замерзлих газів, які мають мізерну пробивну здатність, то стане ясно, що й метеоритну небезпеку також можна перемогти. Але, звичайно, майбутні космічні кораблі повинні бути здатними лавірувати — уникати великих метеоритів.

Найскладнішу науково-технічну проблему являє собою керування польотом ракет. Їх політ проходитиме в накладуваних одне на одне полях тяжіння різних планет. Відірвавшись від Землі, ракета потрапляє в поле тяжіння Сонця і Місяця. У дальших просторах на неї почне діяти притягання Марса і Юпітера.

Командир та штурман космічного корабля повинні вміти враховувати поля тяжіння всіх планет, поблизу яких проходитиме траса космічного перельоту, та вміти ними користуватися. Маневруючи в полях тяжіння, можна навіть збільшувати швидкість ракети. При цьому треба мати на увазі, що керування космічним кораблем зовсім не буде схоже на керування морським судном на Землі. Капітан корабля не буде стояти біля штурвала або подавати команди «право руля» або «ліво руля». Тому що весь шлях між орбітами планет космічний корабель летітиме по інерції, то перевірка правильності маршруту буде, очевидно, покладена на спеціальний «думаючий» електронно-розв'язувальний пристрій. Безперервно обчислюючи координати корабля та звіряючи їх з заданим графіком польоту, така машина швидко виявить відхилення від курсу, обчислить величину і напрям «поштовху», який поверне ракету на правильний курс і передасть відповідну команду двигунам. Усе це буде відбуватися автоматично. Втручання людини буде потрібне лише в тому разі, якщо з'ясується неточність складеного на Землі графіка польоту і його доведеться переробляти вже на трасі.

Конструкція ракети — переможця міжпланетного простору повинна бути дуже досконалою. Але слід пригадати, що вже сьогодні радянська космічна ракета, стартуючи навіть з супутника, який летить низько, могла б зовсім залишити сонячну систему.

У цьому полягає одна з основних переваг штучних супутників, на яку вказував ще Ціолковський. Швидкість, з якою запущено штучний супутник, не пропадає марно. Якщо для відльоту на Венеру з Землі потрібна швидкість 11,5 *км/сек*, то 8 *км/сек* ми вже «витратили» під час запуску супутника. Отже, при старті з нього нам потрібно буде лише 11,5 *км/сек* — 8 *км/сек* = 3,5 *км/сек*.

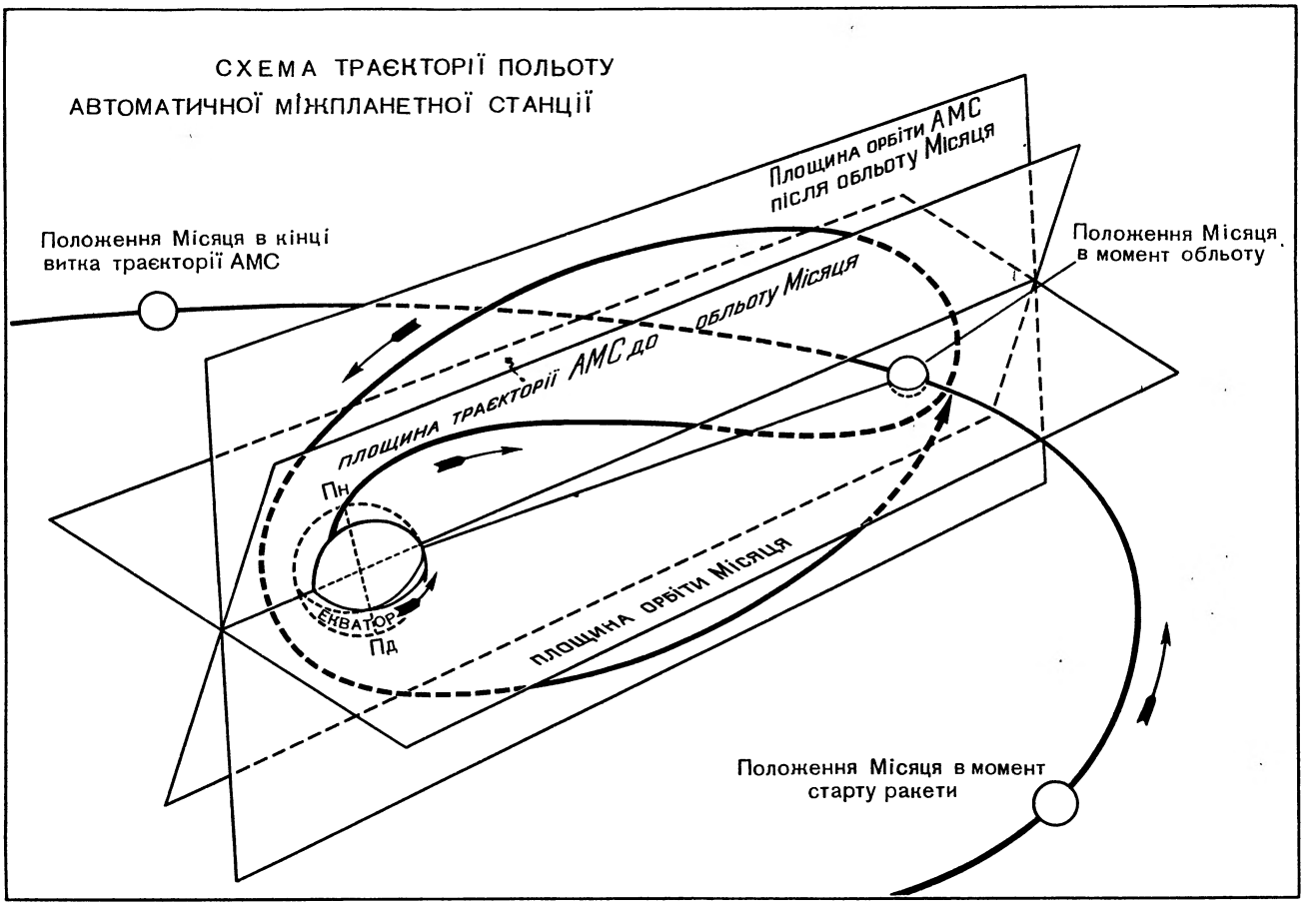
Тому великі населені супутники стануть вигідними стартовими площадками, на яких можна буде поступово заготовити пальне, зібрати ракету, розраховану на порівняно невелику швидкість, і стартувати до найближчих планет.

Міжпланетні станції можуть бути обладнані також на супутниках інших планет, наприклад, на Фобосі або Деймосі — супутниках Марса.

Перелічивши найграндіозніші і найскладніші проблеми штучних супутників, ми не сказали про найважливіше і найпершорядніше завдання — про зворотний спуск на Землю, про безпечне повернення людей і обладнання з космічного простору.

Вже не раз волохаті гавкаючі пасажири спускалися з радянських ракет з висоти 200 *км*. Під час цих дослідів з'ясувалося, що парашут упевнено розкривається на 85-у *км* і купол його добре наповнюється, хоч повітря там майже немає — густина його у 180 тис. раз менша, ніж біля поверхні Землі. Але розкрити парашут нижче від 45 *км* не можна. Виявляється, густина повітря на цих висотах настільки відчутна, а швидкість падіння така велика, що парашут не витримує навантаження і зовсім розлітається на клапті. Але якщо долетіти до 4 *км*, то парашут можна відкривати спокійно. До цього часу густе повітря настільки зменшить швидкість вільного падіння, що парашут легко витримає виникле навантаження. Для його пом'якшення застосовуються багатоступінчасті надвисотні парашути. Їх, зрозуміло, виготовляють із спеціальних матеріалів. Досить сказати, що навіть при швидкості 900 *м/сек* вони не згоряють від тертя об повітря. Але все-таки й на такому парашуті поки що неможливо спуститися з супутника.

Найімовірніше, що єдиним поворотним транспортом ще довго буде космічний планер. Невеликою пороховою ракетою його треба зіштовхнути з супутника в сторону, протилежну рухові супутника. Швидкість планера стане меншою за колову, і він спіраллю почне наближатися до Землі. Крила дозволять йому



Відповідно до наміченої програми наукових досліджень 7 жовтня о 6 годині 30 хвилин московського часу на борту автоматичної міжпланетної станції було проведено включення апаратури, призначеної для одержання зображення невидимої з Землі частини Місяця і наступної передачі цього зображення на Землю.

Для фотографування Місяця автоматична міжпланетна станція має систему орієнтації і фототелевізійну апаратуру з спеціальними пристроями для автоматичної обробки фотоплівки.

Час процесу фотографування було вибрано так, щоб станція на своїй орбіті знаходилась між Місяцем і Сонцем, яке освітлювало близько 70 проц. невидимого боку Місяця. При цьому станція знаходилась на віддалі 60 — 70 тис. *км* від поверхні Місяця.

Включена спеціальною командою система орієнтації повернула станцію так, щоб об'єктиви фотоапарата були спрямовані на зворотний бік Місяця, і дала команду на включення фотоапаратури.

Фотографування Місяця тривало близько 40 хвилин і при цьому було одержано значну кількість знімків Місяця в двох різних масштабах.

Обробка фотоплівок (проявлення і фіксування) була автоматично проведена на борту міжпланетної станції.

Передача сигналів фотозображень Місяця на Землю провадилася за допомогою спеціальної радіотехнічної системи. Ця система одночасно забезпечила передачу даних наукових вимірювань, визначення елементів орбіти, а також передачу з Землі на міжпланетну станцію команд, що керують її роботою. Телевізійна апаратура забезпечила передачу півтонового зображення з високою роздільною здатністю.

На борту автоматичної міжпланетної станції було також розміщено апаратуру, призначену для проведення наукових досліджень у міжпланетному просторі. Одержані результати наукових досліджень записані на плівку наземними станціями.

Робота автоматичної міжпланетної станції на першому оберті показала, що:

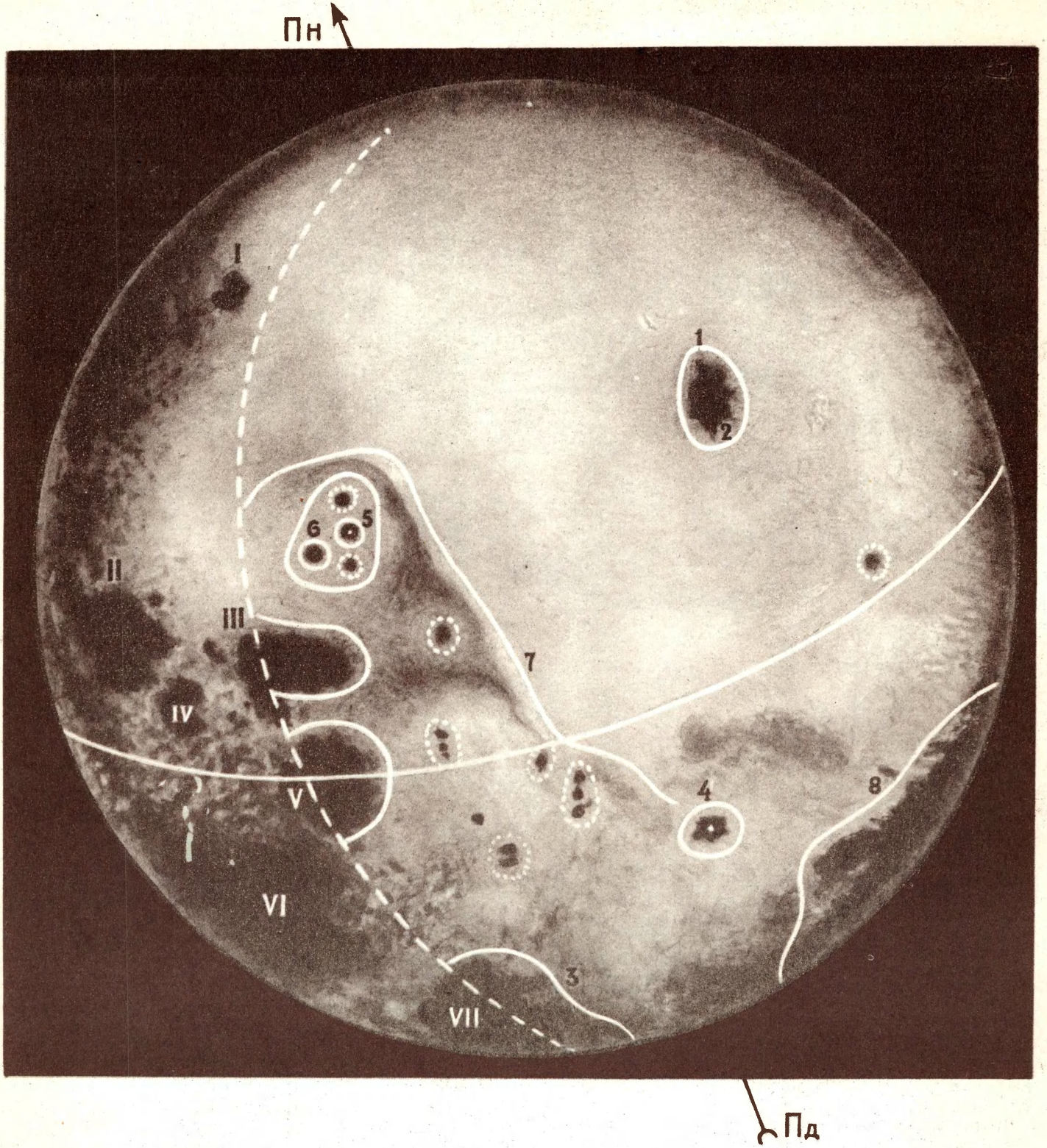
успішно забезпечено політ космічного об'єкта по складній, заздалегідь розрахованій орбіті;

розв'язано завдання орієнтації об'єкта в просторі;

здійснено радіотелемеханічний зв'язок і передачу телевізійних зображень на космічних віддалях;

одержано зображення недоступного досі дослідженням зворотного боку Місяця і ряд інших наукових результатів.

Із повідомлення ТАРС від 27 жовтня 1959 р.



Розподіл об'єктів на невидимому з Землі боці Місяця, виявлених при попередній обробці фотографій, одержаних з борту автоматичної міжпланетної станції: 1. Велике кратерне море діаметром 300 *км* — море Москви; 2. Затока Астронавтів у морі Москви; 3. Продовження Південного моря на зворотному боці Місяця; 4. Кратер з центральною гіркою — Ціолковський; 5. Кратер з центральною гіркою — Ломоносов; 6. Кратер — Жоліо-Кюрі; 7. Гірський хребет — Радянський; 8. Море Мрії. Суцільна лінія, що пересікає схему, — екватор Місяця; пунктирна лінія — границя видимої і невидимої з Землі частин Місяця. Суцільною лінією обведені об'єкти, достовірно встановлені при попередній обробці; пунктирною лінією обведені об'єкти, які потребують уточнення форми; крапками виділені об'єкти, класифікація яких уточняється; в останній частині — провадиться дальша обробка одержаних фотоматеріалів. Римськими цифрами позначено об'єкти видимої частини Місяця: I — море Гумбольдта; II — море Криз; III — море Крайове, яке має продовження на невидимій частині Місяця; IV — море Хвиль; V — море Сміта, яке має продовження на невидимій частині Місяця; VI — море Родючості; VII — море Південне, яке має продовження на невидимій частині Місяця.

планірувати, тому спуск триватиме кілька годин і планер не перегріється. Але все це стосується до спуску з супутників, які летять близько біля Землі, коли близько знаходиться атмосфера, хоч і не дуже густа, і коли планер зразу ж після скидання починає гальмуватися.

А для спуску з майбутніх високорозташованих супутників планеру доведеться гальмуватися кількома етапами. Пройшовши деяку дільницю шляху в атмосфері, він еліпсом вийде в міжпланетний простір «прохолодитися». Потім він ввійде, але вже в густіші шари атмосфери і знову вийде, щоб охолодитися... Так поступово його швидкість зменшиться, і він зможе приземлитися.

А проте навряд чи космічний планер сідатиме сам. Найімовірніше, його перехопить швидкісний літак-матка і на своїй «спині» посадить на Землю: адже перехоплення в повітрі планерів — уже давно освоєна операція.

Але створення населених штучних супутників Землі — не єдине завдання, що стоїть перед дослідниками Космосу. Успішні польоти до Місяця радянських космічних ракет переконливо свідчать про те, що подорожі людини до інших планет можливі і до створення населених супутників.

Якщо за допомогою сучасної ракети до Юпітера можна буде долетіти за кілька років, то до Плутона доведеться летіти піввіку — 50 років! А найближча зірка — α Центавра знаходиться від нас на відстані 40 більйонів *км*. Довгі 4 роки йде світло від цієї зірки до нашого ока, а звук дійшов би тільки через 4 млн. років!

Можливо, зірка, світлом якої ми милуємося, вже давно згасла або вибухнула, а ми й досі її бачимо! Швидкість світла становить 300 тис. *км/сек*. Скільки ж кілометрів воно пройде за рік! Ця цифра з величезною кількістю нулів промовисто говорить про те, що людського життя не вистачить, щоб вирватися до зірок, навіть коли людина досягне на своїх літальних апаратах величезних швидкостей — 50, 150, 500 *км/сек*!

Але для таких швидкостей потрібні й цілком нові види пального. Передбачалось, наприклад, у камеру згоряння помістити щось подібне до повільно вибухаючої атомної бомби. Швидкість витікання продуктів радіоактивного розпаду урану-235 перевищує 10 тис. *км/сек*. Але немає таких жаротривких сплавів, які могли б витримати температуру ядерної реакції. Крім того, утворені продукти розпаду дуже легкі, їх маса мала, а значить, буде мала реактивна тяга, яку розвиває такий двигун. Можливо, удасться додати до струменя атомних осколків якийсь наповнювач, що, до речі, трохи охолодить сопло. Можливо! Поки що це нерозв'язана технічна проблема.

Але, навіть розв'язавши її, людина ще не доб'ється потрібних швидкостей. Як відомо, максимально можлива швидкість — це швидкість світла. До неї, очевидно, і треба прагнути. Тоді швидкість витікання газів повинна майже дорівнювати швидкості світла. Точніше кажучи, витікати повинно саме світло!

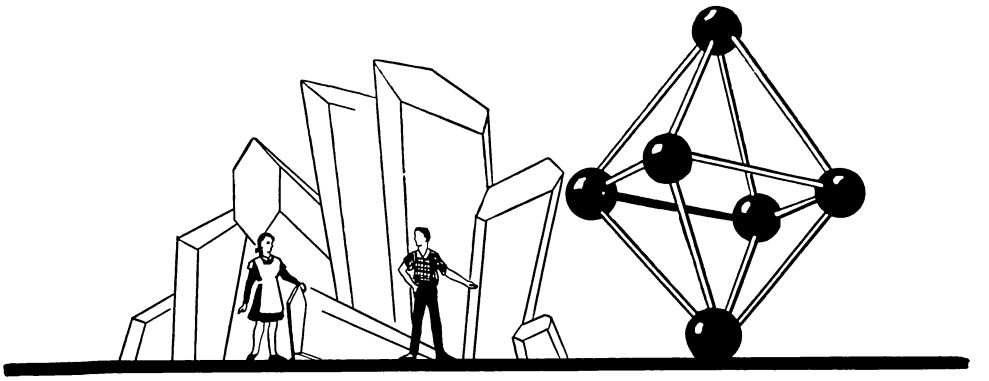
Відомо, що світлові промені утворюють тиск. Показав це знаменитий російський фізик П. М. Лебедєв. За поглядами сучасної фізики, світло має переривчасту будову і складається з фотонів, які мають певну масу. А коли так, значить, світло може виявляти тиск. Підраховано, наприклад, що проміння Сонця тисне на земну кулю з силою 400 тис. *Т*. От якби хоч частину цієї сили «запрягти» в ракету.

Над проблемами створення фотонної ракети вже працює багато вчених. Ідея її ясна, але до технічного здійснення ще далеко. Пробуючи передбачити її конструкцію, багато вчених, наприклад, твердять, що коли потужний термоядерний пальник напрямить потік променистої енергії на величезний відбивач, який відкине його назад, то сам відбивач разом з іншими конструкціями ракети рине вперед з швидкістю, близькою до швидкості світла. Така ракета дійде до Марса за 1 годину. Стане реальною і можливість відвідання далеких зірок. За підрахунками інших спеціалістів виходить, однак, що термоядерний пальник — ця поступово вибухаюча воднева бомба — не годиться як джерело енергії для міжзоряного корабля. Для цього навіть вона дуже слабка! Тільки вся наявна в речовині енергія, цілком перетворена у випромінювання, здатна донести космічний корабель до інших зоряних світів.

Але навіть якби вдалось всю речовину цілком випромінити як світлову енергію, то й тоді важко уявити собі, як напрямити цю феноменальну енергію в одному напрямі, бо будь-яке дзеркало-відбивач миттю випарується, діткнувшись до такого потужного світлового потоку.

Хоч яка привабліва ідея подібного корабля, хоч яка приємна надія коли-небудь відвідати інші зоряні світи, треба визнати, що тепер людство не володіє ніякими технічними засо-

бами навіть для того, щоб лише поставити таку грандіозну проблему. Але технічна мрія — не казка, вона народжується на грунті попередніх досягнень. Тому, яким би сміливим не було дерзання наукової думки, колись воно здійсниться, як здійснились передбачення фантастів минулого про підводні кораблі, літальні апарати, стимулятори росту, синтетичні органічні речовини, як на наших очах здійснюється мрія про завоювання космічного простору. На супутниках із штучною вагою, на найближчих, потім і на далеких планетах люди створять лабораторії, великі наукові центри, астроміста. Здійсниться і мрія сьогоднішнього дня про далекі міжзоряні польоти. Радянські люди створили перше штучне космічне тіло, відкривши еру міжпланетних польотів. Їм же призначено прокласти шлях до зірок.



Будова речовини і робота теплових машин

МОЛЕКУЛЯРНА БУДОВА РЕЧОВИНИ

З чого побудовано навколишній світ? Вперше спробували дати відповідь на це питання стародавні греки понад 25 століть тому.

Відповіді їх здаються на перший погляд дуже чудними, і ми повинні були б витратити багато паперу, щоб з'ясувати читачеві логіку стародавніх мудреців: Фалеса, який твердив, що все складається з води, Анаксімена, який казав, що світ побудовано з повітря, або Геракліта, який вважав, що все складається з вогню.

Непереконливість подібних пояснень примусила пізніших грецьких «любителів мудрості» (так перекладається слово «філософ») збільшити число першооснов, або, як їх називали в ті часи, елементів. Емпедокл твердив, що елементів чотири: земля, вода, повітря і вогонь. У це вчення вніс поправки Арістотель.

За Арістотелем, усі тіла складаються з однієї і тієї самої речовини, але ця речовина може мати різні елементи-властивості. Цих неречовинних властивостей чотири: холод, тепло, вологість і сухість. З'єднуючись по два і будучи надані єдиній речовині, елементи-властивості Арістотеля утворюють елементи Емпедокла. Так, сполучення сухої і холодної речовини дає землю, сухої і гарячої — вогонь, вологої і холодної — воду і, нарешті, вологої та гарячої — повітря.

Зважаючи на труднощі відповіді на ряд питань, стародавні філософи додали до чотирьох елементів-властивостей ще «божественну

квінтесенцію» — щось подібне до бога-кухаря, який зварює в одно різнорідні елементи-властивості. Посиланням на бога, зрозуміло, неважко дати пояснення будь-якій нерозв'язуваній загадці, будь-якому нерозумінню.

А втім, дуже довгий час, майже аж до XVIII ст., мало хто зважувався не розуміти та задавати питання. Вчення Арістотеля було визнане церквою. Сумніви щодо його справедливості каралися як єресь.

А проте сумніви ці виникали. Породила їх алхімія.

Уже в давні часи людина знала, що більшість навколишніх тіл здатна перетворюватися на інші. Такі явища, як сплавлювання металів, горіння, випалювання руди, були добре відомі людям.

Це, здавалось би, не суперечило вченню Арістотеля. При будь-якому перетворенні змінювалось, так би мовити, «дозування» елементів.

Якщо весь світ складається лише з чотирьох елементів, то можливості перетворення тіл повинні бути дуже великі. Треба знайти лише секрет, знати дози, і тоді з будь-якого тіла можна дістати будь-яке інше.

До чого привабливим здавалося навчитися робити золото з свинцю або вугілля, знайти незвичайний «філософський камінь», який дає його володареві багатство, владу, вічну молодість! Науку про виготовлення золота і філософського каменя, про перетворення будь-якого тіла у будь-яке інше середньовічні араби називали алхімією.

Століттями тривала робота людей, які присвятили себе цій науці. Алхіміки не навчились робити золото, не знайшли філософського каменя, зате вони зібрали багато цінних знань про тіла та їх перетворення, і зібрані ними відомості послужили кінець кінцем смертним вироком для самої алхімії. У XVII ст. багатьом стало ясно, що число основних елементів незрівнянно більше від чотирьох. Ртуть, свинець, сірка, золото, сурма виявились нерозкладуваними речовинами. Твердити, що вони побудовані з елементів, було б тепер очевидною нісенітницею. Довелося зарахувати їх до основних елементів світу.

У 1668 р. в Англії вийшла в світ книга Роберта Бойля «Скептичний хімік, або Сумніви й парадокси відносно елементів алхіміків». Тут ми знаходимо цілком нове визначення елементу. Це вже не невловимий, таємничий неречовинний елемент алхіміків. Тепер елемент — це речовина, складова частина тіла.

«Я називаю елементами, — писав Бойль, — деякі первинні та прості, цілком незмішані тіла; ці тіла не складаються з інших тіл або одне з одного і є складовими частинами, з яких складені всі змішані тіла...»

Це цілком сучасне визначення поняття елементу.

Список елементів Бойля невеликий; звичайно, в ньому були й помилки: так, як елемент у спискові значився вогонь. Проте ідеї про елементи-властивості ще довго жили в науці. Навіть у списку великого Лавуазьє, одного з основоположників хімії, поряд з дійсно існуючими елементами фігурують і неіснуючі: теплотвір і світлова речовина.

У першій половині XVIII ст. було відомо 15 елементів. До кінця сторіччя їх кількість зросла до 35. Щоправда, лише 23 з них були дійсно елементами, інші — це або неіснуючі елементи, або такі речовини, як, наприклад, їдкий натр та їдкий калі, які тоді ще не вміли розкладати на складові частини.

В середині XIX ст. хімічні посібники описували вже понад 50 нерозкладуваних речовин.

Нове слово в науці про елементи сказав великий російський учений Дмитро Іванович Менделєєв, який відкрив періодичний закон,

за допомогою якого стало можливим шукати ще не відкриті елементи.

На початку XX ст. були знайдені майже всі елементи, що зустрічаються в природі. Їх виявилось 88. За 40-і та 50-і роки в лабораторних умовах було штучно одержано ще 15 елементів, не існуючих в природі. Усього тепер відомо 101 елемент.

АТОМИ І МОЛЕКУЛИ

Близько 2000 років тому в Стародавньому Римі була написана оригінальна поема «Про природу речей». Її автором був римський поет Лукрецій Кар[1]. Гучними віршами розповів Лукрецій у своєму поетичному творі про погляди старогрецького філософа Демокріта на світ, про його вчення про невидимі частинки, з яких побудовано весь наш світ.

Спостерігаючи різні явища, Демокріт пробував дати їм пояснення. Ось, наприклад, вода. Від сильного нагрівання вона перетворюється в невидиму пару й зникає. Як це можна пояснити? Ясно, що така властивість води зв'язана якимсь чином з її внутрішньою будовою.

Або чому, наприклад, ми відчуваємо запах різних квітів на далекій відстані?

Розмірковуючи над подібними питаннями, Демокріт прийшов до висновку, що тіла тільки здаються нам суцільними, а насправді вони складаються з найдрібніших частинок. У різних тіл ці частинки різні за своєю формою, але вони настільки малі, що побачити їх неможливо. От тому будь-яке тіло й здається нам суцільним.

Припущення, що всі тіла в світі: і земля, і тварини, і рослини, і повітря, і сама людина побудовані з невидимих частинок, дуже просто пояснювало раніш незрозумілі явища природи.

Насправді, якщо вода не є суцільним тілом, а складається з «водяних» частинок, то неважко пояснити її перетворення в пару. Коли вода, що кипить, перетворюється в пару, то це означає, що частинки води відриваються від її поверхні і вилітають у повітря, вже не з'єднуючись одна з одною, як це було в воді.

Так само легко можна пояснити й те, чому ми відчуваємо запахи різних квітів. Від запашних речовин, що є в квітах, відриваються і розлітаються в повітрі окремі невидимі частинки. Ці частинки викликають відчуття запаху.

До думки про таку будову тіл Демокріт доходив і іншим шляхом.

Розмірковуючи над питанням, що станеться, якщо ми почнемо ділити яку-небудь речовину, скажімо, ту саму воду, на дедалі дрібніші частини, він мимоволі замислювався над тим, чи зможемо ми продовжувати це ділення безконечно.

Ні, відповідав філософ, якщо ділити воду досить довго на дедалі дрібніші крапельки, то ми дістанемо, нарешті, такі частинки води, що їх далі вже ділити стане неможливим.

Демокріт назвав ці найдрібніші, неділимі далі частинки, з яких складається вода та всі інші тіла, а т о м а м и, що по-грецьки означає «неподільні».

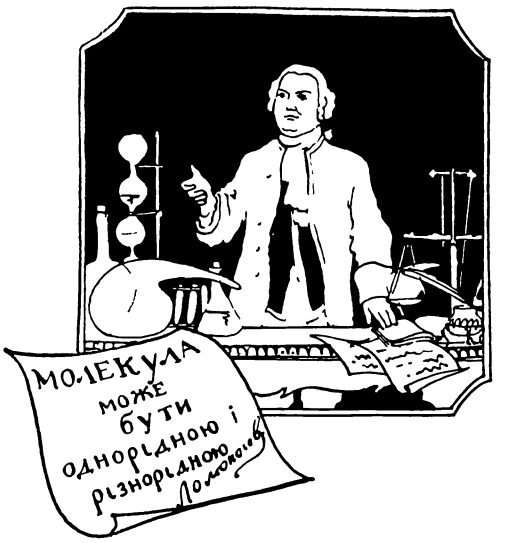
Ось як сформулював він своє вчення про атоми:

«Ніщо не існує, крім атомів та порожнього простору. Все інше є думка. Солодке існує тільки в думці, у думці існує тепло, холод, кольори... Атоми нескінченні кількістю і нескінченно різні за формою».

«Відмінність усіх предметів залежить від відмінності їх атомів щодо кількості, величини, форми та порядку; якісної відмінності атомів не існує».

У 1647 р. француз П'єр Гассенді видав книгу, у якій розвинув далі вчення Демокріта. Він спробував пояснити, яким саме чином можуть виникати і виникають у світі мільйони різноманітних тіл природи. Для цього, твердив він, не треба великої кількості різних атомів.

[1] Докладніше про це розповідається в книзі В. А. Мезенцева «Рассказ о строении вещества».



Адже атоми — це однаково, що будівельний матеріал для будинків. З трьох різних видів будівельних матеріалів — цегли, дощок та колод — можна побудувати величезну кількість найрізноманітніших будинків. Так само з кількох десятків різних атомів природа може створити багато тисяч найрізноманітніших тіл. При цьому в кожному тілі різні атоми сполучаються невеликими групами.

Ці групи Гассенді назвав м о л е к у л а м и, тобто «масочками» (від латинського слова «молес» — маса).

Молекули різних тіл відрізняються одна від одної кількістю атомів, що входять до них, і видом («сортом») цих атомів. Неважко зміркувати, що з кількох десятків різних атомів можна створити величезну кількість різних їх комбінацій — молекул. Ось чому така велика різноманітність тіл навколо нас.

Проте багато ще в поглядах Гассенді було помилкового. Так, він вважав, що є особливі атоми тепла, холоду, смаку і запаху. Як і інші вчені того часу, він не міг цілком звільнитися від впливу Арістотеля, від визнання його нечовинних елементів.

У творах М. В. Ломоносова, великого просвітителя і засновника науки в Росії, є вже інші думки, які дістали підтвердження на досліді набагато пізніше.

Ломоносов пише, що молекула може бути однорідною і різнорідною. У першому випадку в молекули групуються однорідні атоми. У другому — молекула складається з атомів, відмінних один від одного. Якщо яке-небудь тіло складене з однорідних молекул, то це тіло треба вважати простим. Навпаки, якщо тіло складається з молекул, побудованих з різних атомів, таке тіло Ломоносов називає змішаним.

Тепер ми добре знаємо, що різні тіла природи мають саме таку будову. Справді, візьмімо, наприклад, газ кисень: у кожній його молекулі є по два однакові атоми кисню. Це — молекула простої речовини. Якщо ж атоми, з яких складаються молекули, різні,— це вже «змішана», складна хімічна сполука. Молекули такої сполуки складаються з атомів тих хімічних елементів, які входять до складу цієї сполуки. Наприклад, молекула води складається з одного атома кисню і двох атомів водню.

Можна сказати й інакше — кожна проста речовина побудована з атомів одного хімічного елементу; складна речовина включає в себе атоми двох і більше елементів.

Таким чином, поняттю складної речовини відповідає молекула, яка складається з різних атомів. Проста речовина будується з молекул, що складаються з однакових атомів.

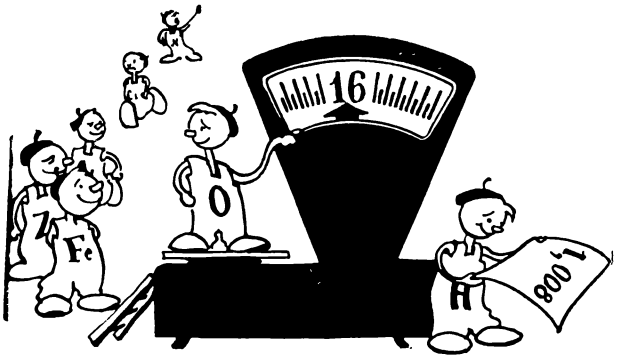
Багато вчених дуже довго «не вірили в атоми». Один з них писав ще наприкінці минулого століття, що через кілька десятиріч атоми «удасться розшукати лише в поросі бібліотек».

Тепер подібні міркування здаються смішними. Ми знаємо тепер таку величезну кількість подробиць про «життя» атома, що сумніватися в його існуванні однаково, що піддавати сумніву реальність Чорного моря. Звичайно, докази про існування атома прийшли не зразу, але супротивники атома були «покладені на обидві лопатки» вже тоді, коли вдалося «зважити» атом.

Відносну вагу атомів визначили хіміки. Спочатку за одиницю атомної ваги була прийнята вага атома водню. Атомна вага азоту дорівнювала приблизно 14, кисню — 16, хлору — 35,5... Тому що кисневі сполуки найбільш поширені, то в дальшому був зроблений дещо інший вибір відносних одиниць атомної ваги, в яких число 16,000 приписувалось кисню. Атомна вага водню дорівнювала в цій шкалі 1,008.

Рядом цікавих дослідів фізикам удалось виміряти абсолютну вагу атомів. Тому що відносна вага відома, то для цього досить було виміряти в грамах вагу атома якої-небудь однієї речовини, наприклад водню.

Зрозуміло, фізики не виготовляли терезів, на які можна покласти один атом і зрівноважити його гиркою. Вага атома визначалася



непрямими вимірюваннями. Наприклад, за допомогою електронного мікроскопа або рентгенівських променів можна виміряти величину об'єму (що припадає на одну молекулу). З другого боку, густина речовини встановлюється простими вимірюваннями. Якщо помножити густину на об'єм, то буде знайдена маса молекули в грамах.

Маса атома з атомною вагою, яка дорівнює одиниці, становить

$$m_0 = 1{,}66 \cdot 10^{-24}\ г.$$

Щоб одержати вагу атома в грамах, треба помножити відносну атомну вагу на m_0.

Уявити собі малість цієї величини можна, якщо припустити, що від кожної людини на земній кулі (а населення Землі понад два мільярди) ви зажадаєте по мільярду атомів. Скільки речовини зберете ви таким способом? Всього кілька мільйонних частин грама.

Або таке порівняння: земна куля в стільки ж разів важча від яблука, у скільки разів яблуко важче від атома водню.

Обернена величина m_0 носить назву числа Авогадро:

$$N = \frac{1}{m_0} = 6{,}023 \cdot 10^{23}.$$

Це величезне число має такий важливий зміст. Візьмемо речовину в такій кількості, щоб число грамів її ваги дорівнювало відносній вазі атома або молекули M. Така кількість називається 1 грам-атом або 1 грам-молекула (часто для стислості замість грам-молекула говорять «моль»). Вага молекули в грамах дорівнює $M \cdot m_0$. Тому число молекул у грам-молекулі будь-якої речовини

$$\frac{M}{Mm_0} = N$$

дорівнює числу Авогадро.

РУХ МОЛЕКУЛ

Чим відрізняється гаряче тіло від холодного? На це питання ще зовсім недавно, аж до початку XIX ст., відповідали так: гаряче тіло має більше теплецю (або теплотвору), ніж холодне. Так само, як суп солоніший, якщо містить більше солі. Ну а що таке теплець? На це була відповідь: «Теплець — теплова матерія, це елементарний вогонь». Таємниче й незрозуміло.

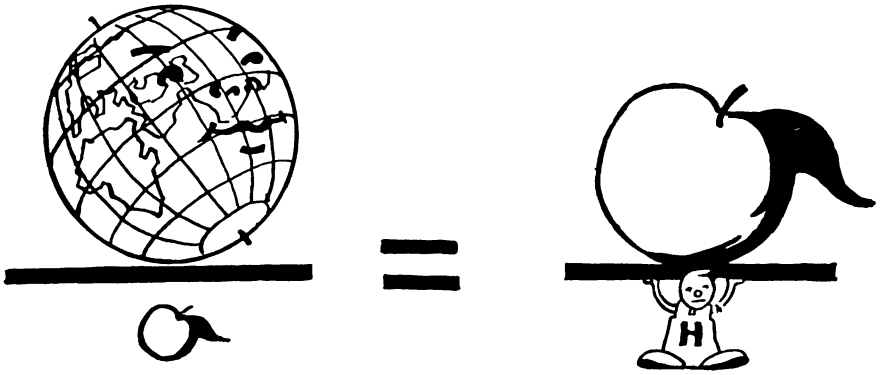
Поряд з теорією теплецю вже давно існував інший погляд на природу теплоти. Його відстоювало багато видатних учених XVI—XVIII століть.

Френсіс Бекон у своїй книзі «Novum Organum» писав: «...сама теплота за своєю суттю є не що інше, як рух... теплота полягає в змінному рухові найдрібніших частин тіла».

Роберт Гук у книзі «Мікрографія» говорив: «...теплота є безперервний рух частин тіла... нема такого тіла, частинки якого були б у спокої».

Особливо чіткі висловлювання такого роду ми знаходимо у Ломоносова в його праці: «Розміркування про причини теплоти та холоду». В цьому творі заперечується існування теплецю і говориться, що «теплота полягає у внутрішньому рухові частинок матерії».

Дуже образно говорив Румфорд в кінці XVIII ст.: «...тіло тим гарячіше, чим інтенсивніше рухаються частинки, з яких воно побудоване, подібно до того як дзвін звучить тим гучніше, чим сильніше він коливається».



В цих чудових здогадах, які набагато випередили свій час, заховані основи наших сучасних поглядів на природу теплоти.

Бувають іноді тихі ясні дні. Листячко на деревах завмерло, навіть легкі брижі не збурять водної гладі. Все навколишнє застигло в суворій урочистій нерухомості. Заспокоївся видимий світ. Але що при цьому відбувається в світі атомів і молекул?

Фізика наших днів може багато розповісти про це. Ніколи, ні за яких умов не припиняється невидимий рух частинок, з яких побудований світ.

Чому ж ми не бачимо всіх цих рухів? Частинки рухаються, а тіло спокійне. Як це може бути? Чи не доводилось вам коли-небудь спостерігати рій комашок? У безвітряну погоду рій ніби висить у повітрі. А всередині рою йде інтенсивне життя. Сотні комах метушаться вправо і вліво, вгору та вниз, а весь рій, проте, лишається на місці, не змінюючи своєї форми.

Невидимі рухи атомів і молекул у тілі мають такий самий хаотичний, безладний характер. Якщо якісь молекули вийшли з деякого об'єму, то на їх місце вступили інші. А тому що нові захожі ніскільки не відрізняються від молекул, які вийшли, то тіло лишається весь час таким самим. Безладний хаотичний рух частинок не змінює властивостей видимого світу.

Але що ж примушує рухатися атоми та молекули? Відповідь проста та повна глибокого смислу: ніщо. Хаотичний рух — це невід'ємна властивість будь-якої частинки світобудови.

«Проте чи не пуста ця розмова? — може запитати нас читач.— Адже ніхто не бачив вічного теплового руху частинок речовини».

Доказ теплового руху частинок можна дістати за допомогою найскромнішого мікроскопа.

Понад сто років тому англійський ботанік Броун, розглядаючи під мікроскопом внутрішню будову рослини, помітив, що малюсінькі часточки речовини, які плавають у соку рослини, безперервно рухаються по всіх напрямах. Ботанік зацікавився: які сили примушують часточки рухатися? Можливо, це якісь живі істоти? Учений вирішив розглянути під мікроскопом дрібні часточки глини, скаламучені у воді. Але й ці, безсумнівно, неживі часточки теж не були в спокої; вони безперервно хаотично рухались. Чим менші були зважені часточки, тим швидше вони рухались. Довго дивився він у мікроскоп, але так і не міг дочекатися, коли рух часточок припиниться.

Рух завислих частинок, що їх спостерігав Броун, відбувається від діяння теплового руху молекул води.

Прямими дослідами можна показати, що інтенсивність теплового руху залежить від температури. Нагріємо тіло — часточки пришвидшать свою вічну ходу, охолодимо — темп руху сповільниться.

Тепловий рух властивий великим і малим часточкам, згусткам молекул, окремим молекулам та атомам.

ЯК ПОБУДОВАНІ МОЛЕКУЛИ

Молекули складаються з атомів. Атоми зв'язані в молекули силами, які називають хімічними.

Є молекули, що складаються з двох, трьох, чотирьох і більше атомів. Найкрупніші молекули — молекули білків — складаються з десятків і навіть сотень тисяч атомів.

Царство молекул має виняткову різноманітність. Вже тепер хіміки виділили з природних речовин і створили в лабораторіях близько мільйона речовин, побудованих з різних молекул.

Властивості молекул визначаються не тільки тим, скільки атомів того або іншого сорту бере участь у їх побудові, але й тим, в якому порядку та в якій конфігурації вони з'єднані. Молекула — це не купа цеглин, а складна архітектурна будова, де кожна цеглина має своє місце та своїх цілком визначених сусідів. Атомна будова, яка утворює молекулу, може бути в більшій або меншій мірі «жорсткою». У всякому разі, кожен атом робить коливання коло свого положення рівноваги. У деяких випадках одні частини молекули можуть обертатися по відношенню до інших частин, надаючи вільній молекулі в процесі її теплового руху різних і найхимерніших форм.

Знаходячись на великих відстанях, атоми притягаються один до одного. Сила взаємодії дуже швидко зменшується з відстанню і стає дуже малою вже на відносно невеликих відстанях. При зближенні сила притягання зростає й досягає свого найбільшого значення вже тоді, коли атоми підійдуть один до одного дуже близько. При ще більшому зближенні притягання слабне і, нарешті, на якійсь відстані зникає зовсім. Ця відстань називається рівноважною. При зближенні атомів до від-

станей, менших від рівноважних, виникають сили відштовхування, які дуже різко наростають, і дальше зменшення відстані стає практично неможливим.

Взаємодію атомів або інших частинок можна зобразити графічно особливою кривою, яку називають кривою взаємодії, або потенціальною кривою (точна назва — крива потенціальної енергії). Смисл її легко зрозуміти, порівнюючи цю криву з профілем викопаної в землі ями. Якщо в таку яму вкотити м'ячик, то він розташується на дні. Дно ями відповідає мінімуму потенціальної енергії. В такому положенні діючі на м'ячик сили зрівноважуються. Зрозуміло, м'ячик не може бути в рівновазі, коли він лежить на краю ями. У такому положенні на м'ячик діє сила, що є великою в тих точках, де край ями крутий, і малою там, де край ями положистий. У міру підіймання м'ячика зростає його потенціальна енергія, що дорівнює, як відомо з механіки, добутку ваги на висоту підйому.

Таким чином, за виглядом профілю ями можна відразу ж сказати, чому дорівнюють потенціальна енергія та діюча на тіло сила для кожної точки профілю. Саме ці відомості й потрібні для того, щоб можна було охарактеризувати взаємодіяння частинок.

На рис. 1 зображена крива потенціальної енергії двохатомної молекули. Кожна точка кривої показує значення потенціальної енергії для тієї або іншої міжатомної відстані. Відстань відкладена по горизонтальній осі, і початку відліку відповідає неможливе положення — нульова міжатомна відстань. Крива має характерний хід для атомів різних сортів — спочатку іде вниз, потім вигинається, утворюючи «яму», і потім більш поступово стає паралельно горизонтальній осі, по якій відкладена відстань між атомами.

Ми знаємо, що стійкий такий стан, в якому потенціальна енергія має найменше значення. Коли атом входить до складу молекули, він «сидить» у потенціальній ямі, роблячи невеликі теплові коливання навколо положення рівноваги. Положенню рівноваги відповідає дно ями. Тому відстань від дна ями до початку відліку називають рівноважною. На цій відстані розташувались би атоми, якби припинився тепловий рух.

Рівноважні відстані (нижче ми будемо говорити коротко — відстані) між атомами різні для різних видів атомів.

Крім відстані від початку відліку до дна ями, різної для різних атомів, важливе значення має глибина ями. Глибина ями має простий смисл: щоб викотитися з ями, потрібна енергія, принаймні рівна глибині. Тому глибину ями можна назвати енергією зв'язку частинок.

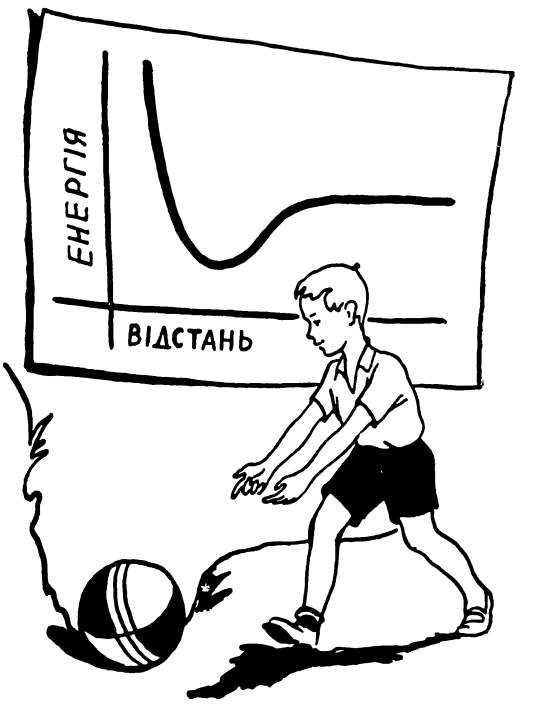


Рис. 1. Енергія двохатомної молекули залежить від відстані між атомами. Мінімальна енергія відповідає рівноважній відстані між атомами.

Відстані між атомами в молекулах настільки малі, що для їх вимірювання довелось вибрати й підходящі одиниці. Інакше довелося б виражати їх значення в такому вигляді:

$$0{,}0000000121 \ см$$

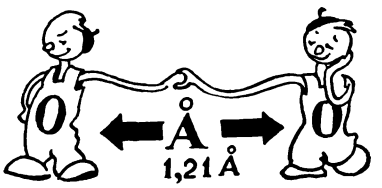
(це ми записали цифру, яка виражає відстань між атомами в молекулі кисню).

Одиниця, що особливо зручна для опису атомного світу, називається ангстремом (правда, прізвище шведського вченого, іменем якого названо цю одиницю, правильно читається Онгстрем; для нагадування про це над буквою А поставлено значок: Å);

$$1 Å = 10^{-8} \ см,$$

тобто одній стомільйонній частині сантиметра.

Відстань між атомами, що входять до складу молекул, лежить в межах від 1 до 4 ангстремів.



Записана вище в сантиметрах рівноважна відстань для кисню дорівнює 1,21 Å.

Міжатомні відстані, як ви бачите, дуже малі. Якщо опоясати земну кулю по екватору вірьовкою, то довжина цього «пояса» у стільки ж разів буде більшою від ширини вашої долоні, у скільки разів ширина долоні більша від відстані між атомами в молекулі.

Для вимірювання енергії зв'язку атомів користуються звичайно калоріями, але відносять їх не до однієї молекули, що дало б, зрозуміло, дуже незначну цифру, а до грам-молекули, тобто до числа грамів, що дорівнює відносній молекулярній вазі.

Енергія зв'язку атомів у молекулі, як і міжатомні відстані, коливається в незначних межах. Для того самого кисню енергія зв'язку дорівнює 116 тис. калорій на моль, для водню — 103 тис. калорій на моль і т. д.

Енергію зв'язку, що припадає на одну молекулу, дістанемо, поділивши ці величини на $6{,}023 \cdot 10^{23}$ (число Авогадро). Звичайно, тут маємо дуже незначні числа порядку 10^{-19} калорій.

Ми вже говорили про те, що атоми в молекулах розташовуються цілком певним способом один відносно одного, утворюючи в складних випадках дуже вигадливі побудови.

Наведемо кілька простих прикладів. Молекули з трьох атомів бувають лінійні (всі три атоми розташовані в ряд) і куткові (зв'язки між атомами утворюють тупий кут). Лінійною є молекула CO_2 — вуглекислого газу, а кутковою (кут 105°) — молекула води H_2O.

У молекулі аміаку NH_3 атом азоту міститься у вершині триграннної піраміди, у молекулі метану CH_4 атом вуглецю знаходиться в центрі чотиригранної фігури з рівними сторонами, яка називається тетраедром.

Атоми вуглецю в молекулі бензолу C_6H_6 утворюють правильний шестикутник. Зв'язки атомів вуглецю з воднем ідуть під кутом 120°. Усі атоми розташовані в одній площині.

Схеми розташування центрів атомів у молекулах бензолу та нафталіну показані на рисунку. Лінії символізують зв'язки (рис. 2).

ЯК ВИМІРЮЮТЬ МОЛЕКУЛИ

Усього якихось півтораста років тому подорож з Європи в Америку забирала багато місяців і була зв'язана з великими труднощами. Тепер таку подорож можна здійснити за 8—10 годин — настільки далеко пішла техніка.

Сучасні методи вимірювання молекули так само відрізняються від первісних способів, що їх використовували для цієї мети, як сучасні літаки від парусного корабля.

Ще 30 років тому здавалось неможливим побачити молекулу. Сьогодні електронні мікроскопи дозволяють розгледіти деталі розміром до 7 Å. Таким чином, більш або менш крупні молекули видно безпосередньо в мікроскоп, і їх розміри можуть бути встановлені прямим вимірюванням. Дальший розвиток техніки

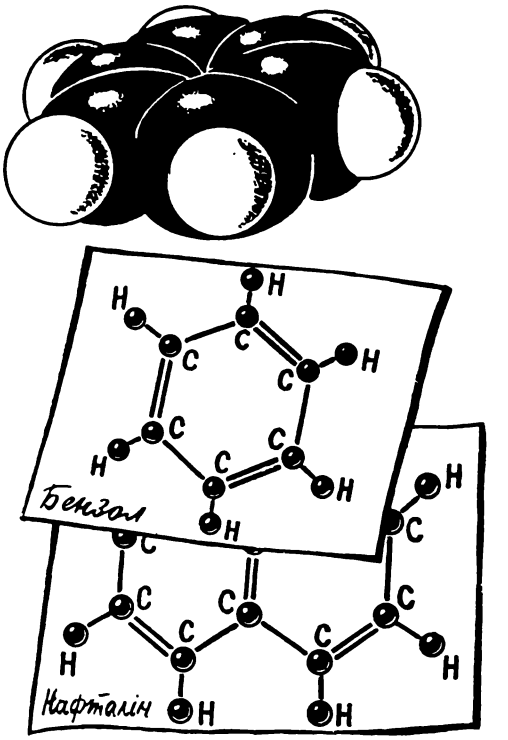


Рис. 2. Схема розташування атомів у молекулах бензолу і нафталіну. В бензолі шість атомів вуглецю і шість атомів водню. Молекула нафталіну споріднена з бензолом: її атоми вуглецю розміщені по кутах двох шестикутників, які мають одну спільну сторону. У нижній частині рисунка показані скелети молекул, у верхній — об'ємна модель молекули бензолу. При сполученні в молекулу атоми водню (білі) і вуглецю (чорні) ніби спресувалися, і молекула набула такої чудної форми.

обіцяє в найближчі роки дістати можливість бачити найдрібніші частинки розміром до 1—2 Å. Тоді стане можливим вимірювати міжатомні відстані. Великі труднощі на цьому шляху створює тепловий рух — він розмазує картину цілком так само, як псує фотографію дитина, яка ніяк не може всидіти спокійно перед об'єктивом фотоапарата.

Точну величину молекул та атомів, кажучи правильніше, величину міжатомних відстаней, здобуто побічними шляхами, а саме методами оптичної спектроскопії, радіоспектроскопії, рентгеноструктурного аналізу, електронографії.

З усіх цих способів дослідження найефективнішим треба вважати рентгеноструктурний аналіз. Рентгенівські промені являють собою електромагнітні хвилі дуже малої довжини — того ж порядку величини, що й міжатомні відстані, тобто 1—2 Å.

Добре вивчено поведінку світлових променів при попаданні на так звану дифракційну решітку, наприклад, прозору пластинку з нанесеними на неї штрихами.

Просте міркування показує, що кут, утворений відхиленим променем і нормаллю до решітки, визначається відношенням довжини хвилі до розмірів «щілини» решітки. Щоб промені відхилялись дуже, довжина хвилі повинна бути дещо меншою, ніж відстань між щілинами. Штрихи дифракційної решітки якраз і наносяться так, щоб цієї умови було додержано. Якщо довжина хвилі світла відома, то вимірюванням кута відхилення можна визначити розмір «щілини» в решітці.

Суть методу рентгеноструктурного аналізу полягає у використанні кристала як дифракційної решітки для рентгенівських променів. Атоми, з яких побудований кристал, відіграють роль «штрихів». Міжатомні відстані та довжина хвиль рентгенівських променів близькі одна до одної. Тому завжди можна підібрати хвилю такої довжини, яка давала б досить велике відхилення падаючих на кристал променів від початкового напряму. Вимірюючи кут відхилення та знаючи довжину хвилі, можна з великою точністю визначити відстань між атомами.

Якщо розміри молекули відомі, то легко вираховується число молекул в одиниці об'єму. Знаючи густину речовини, визначають масу молекули. Такий один з багатьох шляхів, якими сучасна фізика розв'язує питання вимірювання найдрібніших частинок і відстаней між ними.

ВЗАЄМОДІЯ МОЛЕКУЛ

Молекули взаємно притягаються — в цьому неможливо сумніватися. Якби на якусь мить молекули перестали притягатися, то всі рідкі і тверді тіла розпались би і весь світ перетворився в газ.

Молекули відштовхуються, і це безсумнівно, бо інакше рідина стискувалася б так само легко, як і газ.

Між молекулами діють сили, багато в чому подібні до міжатомних сил, про які ми говорили вище. На великих відстанях молекули притягаються слабо, при зближенні сила їх взаємодії спочатку зростає, потім спадає до нуля; при дальшому зближенні молекули відштовхуються.

Крива потенціальної енергії, яку ми тільки що малювали для атомів, правильно передає і основні риси взаємодії молекул. Проте між цими взаємодіями є й істотні відмінності.

Порівняємо між собою, наприклад, рівноважну відстань між атомами кисню, з яких утворюється молекула, і атомами кисню двох сусідніх молекул, що притягнулися до рівноважної відстані. Різниця буде дуже помітна: атоми кисню, які утворюють молекулу, установлюються на відстані 1,21 Å, атоми кисню різних молекул підійдуть один до одного на 2,8Å.

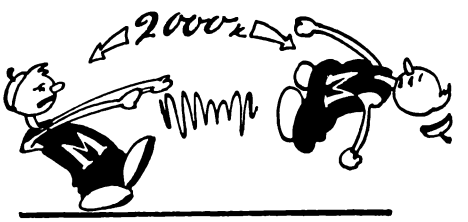
Рівноважні відстані атомів, зв'язаних у молекули, завжди менші від рівноважних відстаней між тими самими атомами, які належать різним молекулам.

На мові потенціальної кривої це означає: яма для атомів, зв'язаних у молекули, розташована ближче до початку координат, ніж яма для атомів сусідніх молекул.

Отже, нагадуємо, атоми двох сусідніх молекул установлюються на дальшій відстані один від одного, ніж атоми, з яких складається молекула. Звідси випливає припущення, що молекули легше відірвати одну від одної, ніж атоми. Так воно і є насправді. Якщо енергія, потрібна для розриву зв'язку між атомами кисню, які утворюють молекулу, дорівнює, як говорилось вище, 116 тис. калорій на моль, то енергія на «розтаскування» двох молекул кисню дорівнює всього 2 тис. калорій на моль.

Отже, на кривій потенціальної енергії молекул яма буде не тільки лежати далі, але й буде менш глибокою.

Але цим не вичерпується різниця між взаємодією атомів, що утворюють молекулу, і взаємодією молекул.



Хіміки показали, що атоми зчіплюються в молекулу з обмеженою кількістю сусідів. Якщо два атоми водню утворили молекулу, то третій атом уже не приєднається до них для цієї мети. Атом вуглецю не може утворити молекулу, більшу ніж з чотирма сусідами і т. д. Ця важлива для хімії властивість носить назву валентності атомів.

Нічого подібного ми не знаходимо в міжмолекулярній взаємодії. Притягнувши до себе одного сусіда, молекула ні в якій мірі не втрачає своєї «притягальної сили». Підхід сусідів буде відбуватися доти, поки вистачить місця.

Взаємодія між молекулами може відігравати більшу або меншу роль у «житті» молекул речовини. У свою чергу роль взаємодії молекул речовини залежить від теплового руху. Чим інтенсивніший тепловий рух, тим менш виявляється молекулярна взаємодія. Три стани речовини — газоподібний, рідкий та твердий — розрізняються тією роллю, яку відіграє в їх існуванні взаємодія молекул.

ТРИ СТАНИ РЕЧОВИНИ

Слово газ походить від грецького слова «хаос», що означає «безладдя».

І справді, газоподібний стан речовини є прикладом здійснюваного в природі повного, цілковитого безладдя у взаємному розташуванні і русі частинок.

Нема такого мікроскопа, який дозволив би побачити рух газових молекул, але, незважаючи на те, фізики можуть досить детально описати життя цього невидимого світу.

В кубічному сантиметрі повітря за нормальних умов (кімнатна температура та атмосферний тиск) знаходиться величезна кількість молекул, приблизно $2{,}7 \cdot 10^{19}$ (тобто 27 мільярдів молекул). На кожну молекулу припадає об'єм близько $0{,}4 \cdot 10^{-19}$ *см*^{3}, тобто кубик з стороною приблизно $0{,}35 \cdot 10^{-6}$ *см*. Проте молекули дуже малі. Наприклад, молекули кисню та азоту — основна частина повітря — мають розмір близько 5 Å, тобто $5 \cdot 10^{-8}$ *см*. Таким чином, середня відстань між молекулами приблизно в десять раз більша від розміру молекули. А це в свою чергу означає, що середній об'єм газу, на який припадає одна молекула, приблизно в 1000 раз більший від об'єму самої молекули.

Уявіть собі рівну площадку, на якій безладно розкидані монети, причому на площу 1 *м*^{2} припадає в середньому 100 монет. Приблизно так само рідко розташовані газові молекули (рис. 3).

Кожна молекула газу перебуває в стані безперервного теплового руху. Простежимо за однією молекулою. Ось вона стрімко рухається кудись праворуч. Якби на її шляху не зустрілось перешкод, то вона з тією самою швидкістю рухалася б далі по прямій лінії. Але шлях молекули пересікають її незчисленні сусіди. Зіткнення неминучі, і молекули розлітаються, як дві більярдні кулі, що зіткнулися. В який бік відскочить молекула, збільшиться чи зменшиться її швидкість? Все можливе: адже зустрічі можуть бути найрізноманітніші. Удар швидшої молекули ззаду збільшить швидкість нашої молекули, зустріч спереду сповільнить її. Бічні удари можуть бути завдані справа і зліва, сильно і слабко. Ясно, що, зазнаючи таких безладних співударів у результаті цих випадкових зустрічей, молекула, за якою ми стежимо, буде безперервно метатися по посудині, де міститься газ.

Який шлях удається молекулам газу пробігти не зіткнувшись? У цьому відношенні газ треба схарактеризувати середніми величинами, бо час вільного пробігу від одного співудару до другого змінюватиметься в широких межах. При цьому, зрозуміло, немає ніякого закономірного зв'язку між двома пробігами, що йдуть один за одним.

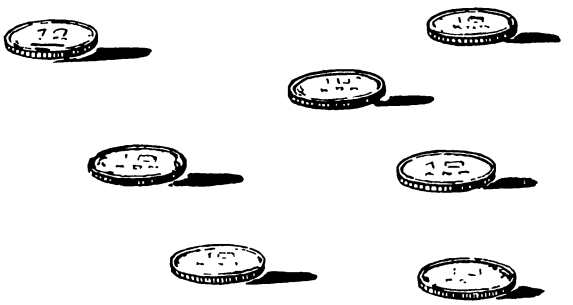


Рис. 3. Так рідко розміщені кожної миті молекули газу.

Середня довжина пробігу залежатиме від розмірів молекул і від густини газу. Чим більші розміри молекул і кількість їх у посудині, тим частіше вони стикатимуться між собою: середня довжина шляху, який пробігає молекула без співудару, дорівнює за нормальних умов 10^{-5} *см* = 1000 Å для водню і $5 \cdot 10^{-6}$ *см* = 500 Å для більшої молекули кисню. Відстань 10^{-5} *см* — десятитисячна частка міліметра — дуже мала, але порівняно з розмірами молекул вона зовсім не мала. Пробіг молекули в 10^{-5} *см* відповідає пробігу більярдної кулі в 25 *м*.

Будова рідини істотно відрізняється від будови газів. Причина в тому, що роль міжмолекулярних сил для рідин досить істотна і сусідні молекули проводять досить значну частину свого життя в ямах потенціальних кривих взаємодії молекул.

Спільне між рідиною і газом полягає в цілком безладному розміщенні молекул. Відмінність рідини від газу полягає лише в тіснішому розташуванні молекул.

Через те що молекулам рідини тісно, вони не можуть рухатися так вільно, як у газі. Кожна молекула майже весь час «тупцює» на одному й тому самому місці в оточенні тих самих сусідів і тільки потроху переміщується. Чим рідина в'язкіша, тим цей рух менший.

Найрішучіше розправляються сили взаємодії частинок речовини з їх тепловим рухом у твердих тілах. У твердій речовині частинки практично весь час перебувають у потенціальних ямах. Єдино можливий рух — це коливання навколо положень рівноваги. Відсутність поступальних переміщень частинок і є причиною того, що тверде тіло — тверде.

КРИСТАЛИ

Кристали... Багато хто думає, що це красиві камені, які рідко зустрічаються. Вони бувають різного кольору, здебільшого прозорі і, що найцікавіше, мають красиву, правильну форму. Звичайно кристали являють собою многогранники, сторони (грані) їх ідеально плоскі, ребра — абсолютно прямі. Вони милують око чудовою грою світла в гранях, дуже дивною правильністю будови.

Є кристали скромні, наприклад, кристали кам'яної солі — природного хлористого натрію, тобто звичайної кухонної солі. Вони зустрічаються в природі у вигляді прямокутних паралелепіпедів або кубиків. Просту форму мають і кристали кальциту — прозорі косокутні паралелепіпеди.

Набагато складніші кристали кварцу. У кожного кристалика безліч граней різної форми, що перетинаються по ребрах різної довжини.

Кристали оточують нас всюди. Тверді тіла, з яких ми споруджуємо будинки і робимо верстати, речовини, які ми вживаємо в побуті, — майже всі вони належать до кристалів. Чому ж ми цього звичайно не помічаємо? Справа в тому, що ми рідко знаходимо в природі тіла у вигляді окремих поодиноких кристалів (або, як кажуть, монокристалів). Найчастіше речовина зустрічається у вигляді міцно зчеплених найдрібніших кристалічних зерняток. Кожне з цих зерняток менше за тисячну частку міліметра. Таку структуру можна побачити лише в мікроскоп.

Тіла, що складаються з кристалічних зерняток, називаються дрібнокристалічними, або полікристалічними («полі» — багато). Їх, звичайно, також треба віднести до числа кристалів. Тоді виявиться, що майже всі тверді тіла, які оточують нас, — кристали. Пісок і граніт, мідь і залізо, салол, що продається в аптеці, і сухі фарби — все це кристали.

Але є й винятки: скло і пластмаси не складаються з кристалів. Такі тверді тіла називаються аморфними.

Отже, вивчати кристали — це означає вивчати майже всі тіла, що оточують нас. Зрозуміло, як це важливо.

Поодинокі кристали зразу можна пізнати завдяки правильності їх форми. Плоскі грані і прямі ребра є характерною властивістю кристала; правильність форми, безсумнівно, зв'язана з правильністю внутрішньої будови кристала.

Але уявіть собі, що з великого кристала виготовлено кулю. Чи можна догадатись, що в руках у нас кристал, і відрізнити цю кулю, скажімо, від скляної кулі? Так, можна, тому що кристали мають одну особливість — їх властивості залежать від того напряму, в якому розглядається кристал. Так, у поздовжньому перерізі кристала міцність, електропровідність, теплопровідність будуть іншими, ніж у поперечному. Ця особливість кристала називається анізотропією його властивостей. Анізотропний — це означає різний у різних напрямах.

Кристали анізотропні. Навпаки, аморфні тіла, рідини і гази — ізотропні, тобто мають

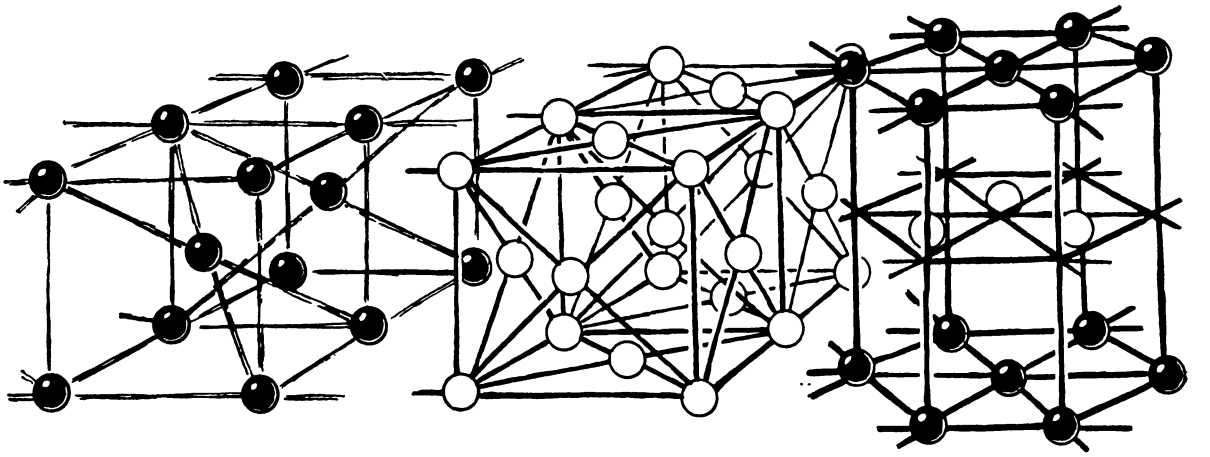


Рис. 4. Три типи поширених кристалічних решіток одноатомних речовин. Ліворуч — вольфрам; у центрі — мідь; праворуч — магній.

однакові властивості в різних напрямах («ізо» по-грецьки — однаково, «тропос» — напрям).

Анізотропія властивостей і дає можливість дізнатися, чи є кристалом кусочок речовини будь-якої форми.

БУДОВА КРИСТАЛІВ

Чому така красива і правильна форма кристала? Грані його, блискучі і рівні, виглядають так, ніби над ними попрацював найвправніший шліфувальник. Окремі частини кристала повторюють одна одну, утворюючи красиву симетричну фігуру.

Відповідь на це запитання може бути лише одна — зовнішній красі повинна відповідати внутрішня правильність. Ця правильність полягає в багаторазовому повторенні тих самих основних частин.

Уявіть собі паркові грати, зроблені з прутів різної довжини і розташовані безладно. Потворне видовище! Добрі грати будуються з однакових прутів, розташованих у правильній послідовності на однаковій відстані один від одного.

Таке саме явище ми знаходимо в шпалерах. Тут елемент малюнка повторюється вже не в одному напрямі, як у паркових гратах, а заповнює площину.

Яке ж відношення мають паркові грати і шпалери до кристала? Найпряміше. Паркові грати складаються з частин, які повторюються вздовж лінії, шпалери — з малюнків, що повторюються на площині, а кристал — з груп атомів, які повторюються в просторі. Тому й кажуть, що атоми в кристалі утворюють просторову (або кристалічну) решітку.

Тепер відома будова багатьох сотень кристалів. Розповімо про будову найпростіших кристалів і насамперед тих, які побудовані з атомів одного виду.

Найпоширеніші три типи решіток. Вони показані на рис. 4. Кульками і кружечками зображені центри атомів; ліній, що їх з'єднують, в дійсності не існує. Їх проведено тільки для того, щоб пояснити читачеві характер просторового розміщення атомів.

Лівий і середній рисунки зображають кубічні решітки. Щоб ясніше уявити собі ці решітки, припустіть, що ви склали найпростішим способом — ребро до ребра, грань до грані — дитячі кубики.

Якщо тепер в думці розмістити точки по вершинах та центрах об'ємів кубів, то виникне кубічна решітка, що зображена на лівому рисунку. Така структура називається кубічною об'ємноцентрованою. Якщо розмістити точки по вершинах кубів і в центрах їх граней, то виникне кубічна решітка, зображена на середньому рисунку. Вона називається кубічною гранецентрованою.

Третя решітка називається найщільнішою гексагональною (тобто шестикутною). Щоб зрозуміти походження цього терміна та ясніше уявити собі розташування атомів у такій решітці, візьмемо велику кількість більярдних куль і почнемо укладати їх, намагаючись створити найщільнішу упаковку. Насамперед складемо щільний шар — він має такий вигляд,

як більярдні кулі, зібрані «трикутником» перед початком гри. Відзначимо, що шар всередині трикутника має шість сусідів, які стикаються з ним, і ці шість сусідів утворюють шестикутник.

Продовжимо укладку накладанням шарів один на одного. Якби ми помістили кулі наступного шару безпосередньо над кулями першого шару, то така упаковка була б нещільною. Намагаючись розмістити в деякому об'ємі найбільшу кількість куль, ми повинні покласти кулі другого шару в лунки першого, третього шару в лунки другого і т. д. В гексагональній найщільнішій упаковці кулі третього шару розміщено так, що їх центри лежать над центрами куль першого шару.

Центри атомів у гексагональній найщільнішій решітці розташовано так, як центри куль, щільно укладених описаним способом.

У трьох решітках, які тут намальовані, кристалізується майже половина елементів менделєєвської таблиці. Наприклад:

гексагональна найщільніша упаковка — берилій, магній, гафній;

кубічна гранецентрована — срібло, алюміній, золото, мідь;

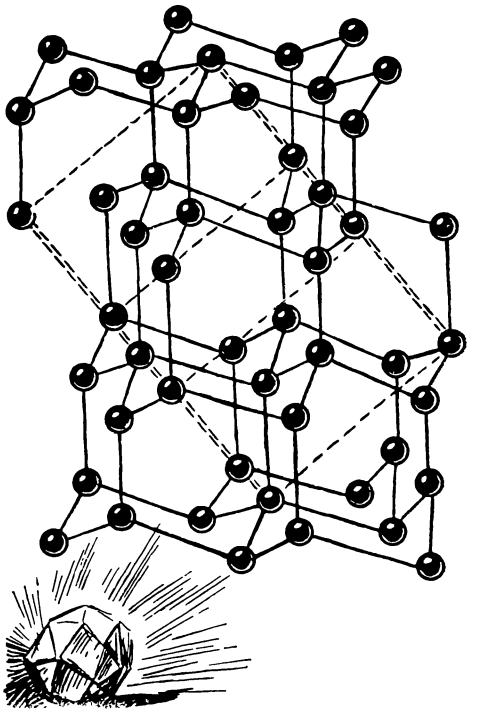


Рис. 5. Так побудована кристалічна решітка алмазу.

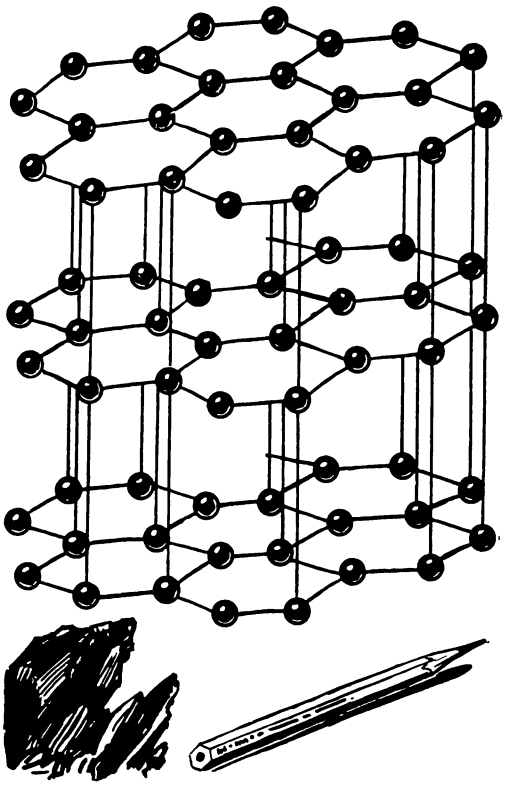


Рис. 6. Кристалічна структура графіту.

кубічна об'ємноцентрована — калій, барій, вольфрам.

Серед інших структур згадаємо лише небагато. На рис. 5 зображена структура алмазу. Для цієї структури характерна та обставина, що в атома вуглецю в алмазі є чотири найближчі сусіди. Це число корисно зіставити з відповідними числами описаних тільки що трьох найпоширеніших структур. Як видно з рисунків, в найщільнішій гексагональній упаковці кожного атома дванадцять найближчих сусідів, стільки ж сусідів у атомів, які утворюють гранецентровану кубічну решітку; в об'ємноцентрованій решітці у кожного атома вісім сусідів.

Ще кілька слів скажемо про графіт, будова якого показана на рис. 6. Особливість цієї структури впадає в вічі. Графіт складається з шарів атомів. Атоми одного шару зв'язані між собою дужче, ніж атоми, що належать сусіднім шарам. Це видно з величини міжатомних відстаней: в одному шарі відстань між атомами в $2^1/_2$ рази менша найкоротшої відстані між шарами.

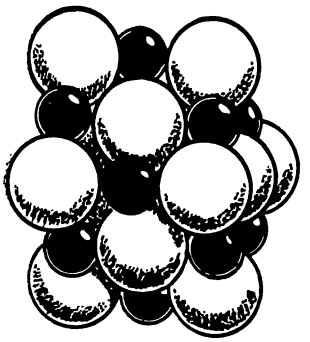


Рис. 7. Структура кристала кухонної солі. Маленькі кулі — атоми натрію, великі кулі — атоми хлору.

Наявність слабозв'язаних атомних шарів спричиняється до того, що кристали графіту легко розщеплюються вздовж цих шарів. Тому твердий графіт може бути мастильним матеріалом у тих випадках, коли неможливе застосування мастил, наприклад, коли швидкість руху тертьових частин дуже мала, а також при високій температурі. Зусилля, достатнє для того, щоб розщепити мікроскопічний графітовий кристалик, набагато менше від сил тертя, тому графітове мастило значно полегшує ковзання одного тіла по іншому.

Надзвичайно різноманітні структури кристалів хімічних сполук. Крайніми — в розумінні відмінностей — прикладами можуть бути структури кам'яної (кухонної солі) і двоокису вуглецю. Кристали кам'яної солі складаються з атомів натрію і хлору, які чергуються вздовж осей куба (рис. 7). Кожен атом натрію має шість рівновіддалених сусідів іншого сорту. Те саме стосується й до хлору. Але де ж молекула хлористого натрію? Її нема; в кристалі відсутня не тільки група з одного атома натрію і одного атома хлору, але й взагалі яка б то не була група атомів.

Хімічна формула NaCl не дає нам підстав говорити: «Речовина побудована з молекул NaCl». Хімічна формула вказує лише, що речовина побудована з однакового числа атомів натрію та хлору. Питання про існування молекул у речовини розв'язується структурою. Якщо в ній не відокремлюється група близьких атомів, то молекул немає. Кристали без молекул називаються атомними.

Кристал вуглекислого газу CO_2 (сухого льоду, що лежить в ящиках у продавців морозива) — приклад молекулярного кристала. Центри атомів кисню і вуглецю молекули CO_2 розташовані вздовж прямої лінії. Відстань між ними дорівнює 1,3 Å. А ось відстань між атомами сусідніх молекул — близько 3 Å. Ясно, що за таких умов ми зразу ж «пізнаємо» молекулу в кристалі.

Молекулярні кристали являють собою щільні упаковки молекул. Щоб це бачити, треба обрисувати контури молекули. Це й зроблено на рис. 8.

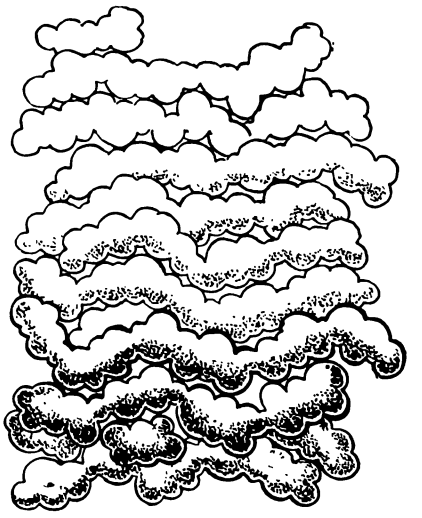


Рис. 8. Структура кристала органічної речовини, що входить до складу білка. Великі молекули щільно прилягають одна до одної.

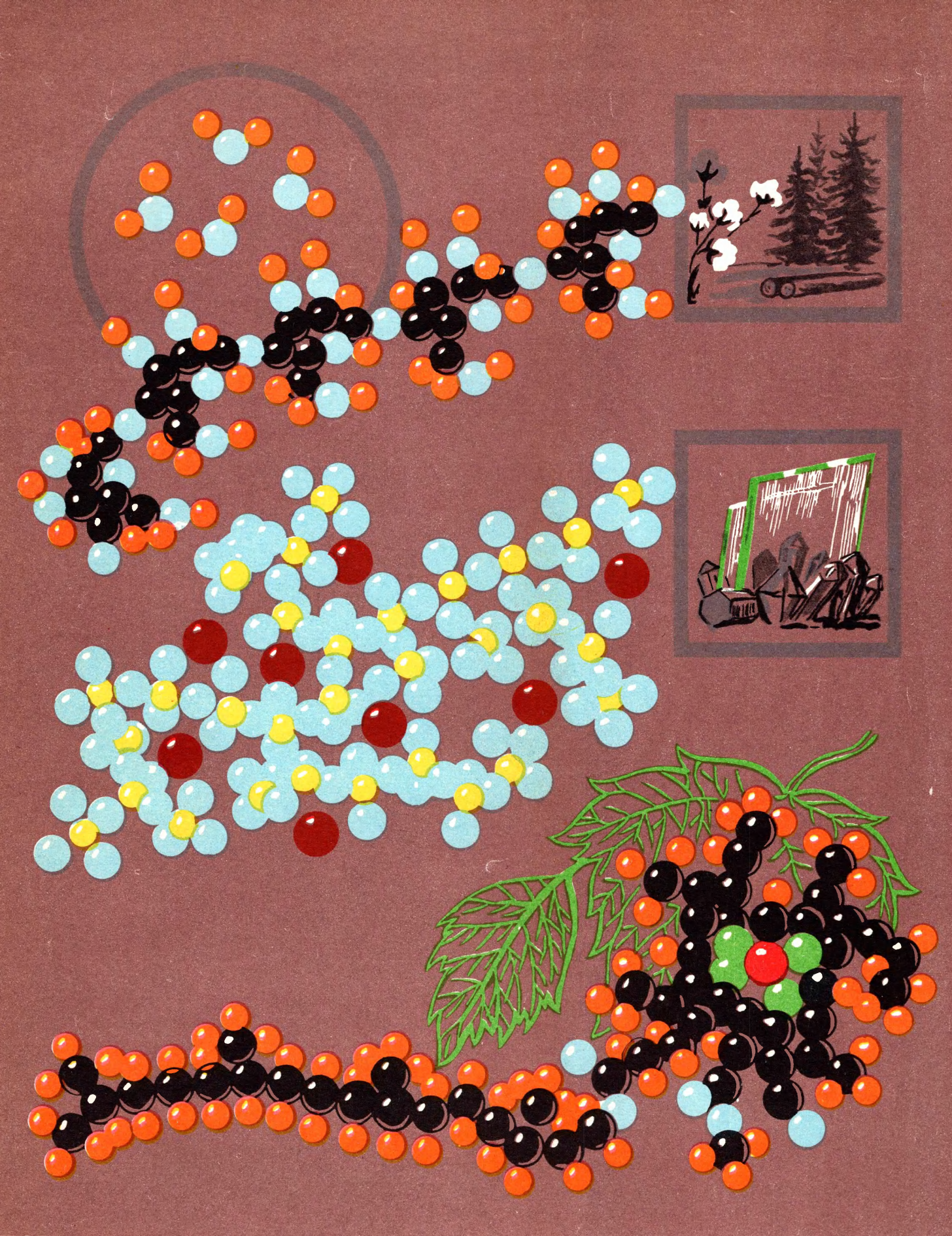
ПОРЯДОК І БЕЗЛАДДЯ В СВІТІ АТОМІВ

Акуратність — немала́ доброчесність. У хорошої хазяйки в шафі для білизни речі розкладені по поличках у суворому порядку: на одних поличках сорочки, на інших простирадла; і в буфеті розставлено так, що глибокі тарілки стоять в одній стопці, мілкі — в іншій... Природне бажання запровадити аналогічний порядок і в господарстві науки — «розкласти по поличках», згрупувати за якимись характерними ознаками окремі явища, тіла, закони природи. Таке групування називається класифікацією і часто приносить велику користь науці, виявляючи споріднені риси різних явищ.

Проте у всякій класифікації закладено суперечність. Спробуйте, наприклад, поділити людей за зростом на три групи: високих, середніх і низеньких. Кого ви вважатимете високою людиною? Ну, скажімо, людину, зріст якої більший від 180 *см*. Доведеться тоді двох фактично однаково високих людей — одну 179,9 *см* на зріст, а другу 180,1 *см* на зріст «віднести» до різних груп.

З прикладом такої суперечності ми зустрічаємося при спробі поділити всі тіла, що оточують нас, на газоподібні, рідкі й тверді. Вода — рідина,

Таблиця 17. Ми живемо в світі кристалів. З них побудовано багато навколишніх предметів. У верхній частині рисунка — кристалічна структура сталі, посередині — сахарози, внизу — пеніциліну.



а що таке смола, якій нагріванням можна надати будь-якої в'язкості? Адже смолу можна безперервно переводити з такого рідкого стану, як вода, в такий твердий стан, як дерево.

Та, можливо, неправильно вибрано ознаку класифікації? Ми намагались поділяти тіла на групи за їх властивістю — твердістю. Спробуємо покласти в основу не властивість, а будову тіла.

На перший погляд справа стоїть просто: передусім ми поділяємо тіла на дві групи. В одних тілах атоми й молекули укладено в певному порядку — це кристалічні речовини, а інші побудовані з безладно розташованих частинок. У другу групу потрапляють рідини та гази. Характер розташування частинок у цих двох станах має багато спільного; головна відмінність полягає в густині. Не дивно, що завжди є можливість безперервним збільшенням тиску привести газ у такий густий стан, який нічим не відрізняється від рідини. Здавалося б, дві групи тіл відрізняються одна від одної цілком виразно. Що спільного між структурою кристала, атоми якого заповнюють простір регулярним повторенням, і будовою краплини води, молекули якої зібрані в тісну, але безладну купу. Справді, різниця між порядком і безладдям у розташуванні частинок велика. Але уважне вивчення природи показує, що в упорядкованому розміщенні, як правило, є елементи безладдя, що в безладному розташуванні існують елементи порядку і що є безліч тіл, побудованих так, що їх з однаковим успіхом можна віднести на «полиці» як порядку, так і безладдя.

На рис. 9 подано фотографію кристала, зняту за допомогою електронного мікроскопа.

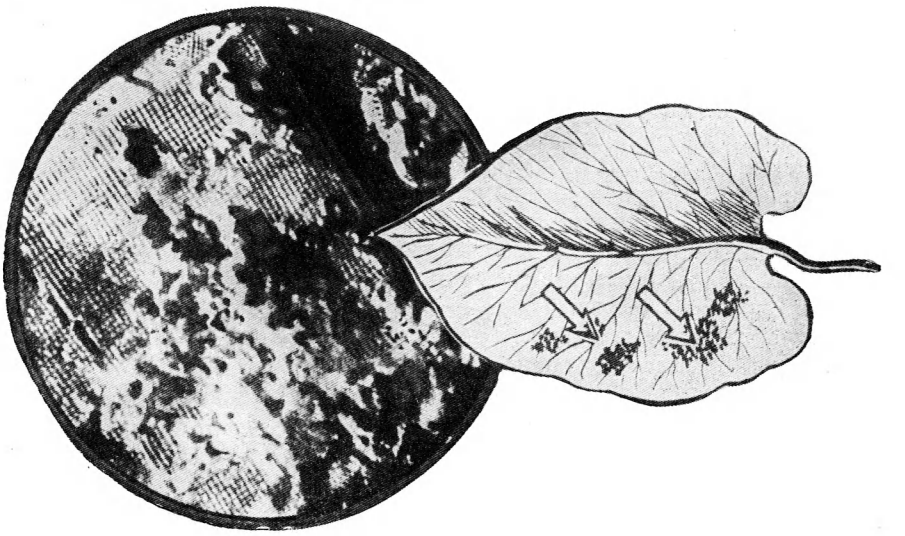


Рис. 9. Фотографія кристала хвороботворного вірусу, який розвинувся на тютюновому листку. Кристал побудовано з дуже великих молекул, які вдається розгледіти за допомогою електронного мікроскопа. У фокусі знаходиться поверхня одного з кристалів. Інші кусочки об'єкта не попали в фокус, і їх видно нерозбірливо.

Молекули щільно укладено рядами, ряди укладено шарами, з шарів будується кристал. Але ми бачимо, яка далека від досконалості упаковка молекул: у будові багато різних дефектів — тут і викривлення рядів, і маленькі порожнини... Фотографія зображає добрий кристал. У природі зустрічаються кристали кращі (у світі дорогоцінних каменів), але більшість кристалів ще «гірша» щодо порядку в розташуванні частинок, ніж той кристал, який показано на фотографії.

Легко уявити собі, що при зростанні кількості дефектів подібність до паркових грат і шпалер поступово втрачатиметься, а проблема розрізнення кристала та рідини перестане бути сама собою зрозумілою.

Ми пояснили, в чому полягають елементи безладдя в порядку кристалічного тіла, а тепер треба сказати, в чому полягає впорядкованість рідини. Упорядкованість молекул у рідині є наслідком тісноти в їх розташуванні. Кожна молекула буде оточена максимальною кількістю сусідів. Ця кількість дорівнює 12

Таблиця 18. На рисунку показані структури речовин різного ступеня впорядкованості. Зверху зображена частина молекули целюлози. Молекули целюлози вкладаються одна вздовж іншої і утворюють досить упорядковану структуру. Целюлозу не можна віднести ні до кристалічних, ні до аморфних тіл Скло (посередині) є класичним представником аморфних тіл. Атоми скла розташовані безладно, тому шматок скла застигає з розплаву в безформну (аморфну) масу Правильну форму скляним виробам надають шліфовкою. Внизу зображена молекула хлорофілу. Цю речовину, як і целюлозу, не можна віднести ні до аморфних, ні до кристалічних тіл.

для молекул, форма яких більш-менш близька до сферичної. Для довгих молекул (у формі палички) кількість найближчих сусідів дорівнюватиме 6, як у пачці олівців. Проте елементи порядку проявляються не тільки серед найближчих сусідів, але й у взаємній орієнтації молекул. Через тісноту молекули намагатимуться розташуватися так, щоб виступаючі частини одних припали на «западини» інших. В результаті виявиться, що всі молекули дуже схожим способом оточені своїми сусідами — у цьому й полягають елементи порядку в безладді. Для багатьох в'язких рідин цей вид порядку може бути виражений дуже ясно (його називають близьким порядком). У кристалах існує далекий порядок, який полягає в регулярному повторенні частинок.

У природі є й такі тіла, які ніяк не можна віднести ні до рідини, ні до кристалів. У дечому ці тіла цілком упорядковані, а в іншому виявляють повну хаотичність у розташуванні молекул. До них належать рідкі кристали та газокристали.

Уявіть собі полк солдатів, який вишикувався по команді «струнко». Солдати стоять на однакових відстанях один від одного, правильними рядами. Крім того, всі вони повернулись однаково і дивляться в один бік. Такий стрій можна порівняти з строєм молекул у доброму кристалі. Тепер припустимо, що, залишаючись на тих самих місцях, солдати повернулись у різні сторони і дивляться «хто куди». До певної міри в строю зберігся порядок: як і раніше, однакові відстані між сусідами, як і раніше, виразно видно акуратні ряди. У цьому відношенні порядок зберігся. Але тепер порівняння з добрим кристалом відпадає і виявляється, такий «вільний стрій» має своїх представників і в світі твердих речовин. У ряді кристалів молекули утворюють правильну решітку своїми центрами та осями, але орієнтація молекул безладна.

Яскравим прикладом такої будови можуть бути частинки мила. Молекули мила — довгі палички. У твердому тілі вони розташовуються шарами, кожний шар складається з паралельних молекул, утворюючи подібність до пачки олівців. Коли мило розчиняють у воді, вода проникає між шарами, а шари продовжують своє існування і в розчині, але тільки не у вигляді вирівняного строю, а у вигляді тільки що описаного вільного строю. Коли ми миємо руки, шари паличкових молекул легко ковзають одна по одній, захоплюючи своїми чіпкими кінцями частинки бруду. От тому мило й миє.

МОЛЕКУЛИ-ГІГАНТИ

Метал, дерево, камінь і скло — ось матеріали, з яких ще недавно було зроблено величезну кількість предметів, оточуючих людину. Тепер до цих матеріалів приєднався ще один — пластмаса. З пластмаси роблять посуд, виготовляють паркет, облицьовують стіни; з пластмаси виготовляють деталі машин, роблять кузови автомобілів. Пластмаса веде рішучий наступ на старі матеріали, успішно витісняючи їх з найрізноманітніших ділянок життя та техніки.

Не менші зміни відбуваються щодо матеріалів, які йдуть на виготовлення одягу. До недавнього часу одяг виготовляли виключно з природних матеріалів — шкіри і шерсті тварин, а також з рослин. Тепер ми бачимо, як з'являються все нові й нові вироби з штучного волокна, відомі всім під назвами капрон, нейлон, перлон. Слідом за жіночими панчохами з'явилася білизна, за нею костюми, пальта, шуби... З штучних матеріалів виготовляється й значна частина взуття. Процес витіснення старих матеріалів новими тільки почався. Але вже для всіх очевидно, що майбутнє належить штучному волокну.

Пластмаси і волокна створені з молекул-гігантів, які мають сотні тисяч атомів. Розміри таких молекул дуже великі, і їх можна бачити за допомогою електронного мікроскопа.

Волокна побудовані з молекул, атоми яких витягнуті ланцюжком. Здебільшого молекула складається з груп атомів, що регулярно повторюються. Якщо витягнути таку молекулу в лінію — виявиться суворий порядок слідування груп атомів. Порядок цей такого самого типу, як у ряді атомів, які утворюють кристал. Довжина такої молекули може досягати величезної (для атомного світу) величини — десятків і сотень тисяч ангстремів (тобто доходити до сотих часток міліметра). Волокно складається з пачок таких довгих молекул. Пачки розташовані в основному вздовж осі волокна, вони переплетені між собою подібно до ниточок вірьовки.

Молекули, що становлять пачку, можуть вистроїтися в дуже строгому порядку. Але звичайно цього порядку не додержано вздовж усієї довжини пачки. Ділянка строгої бокової укладки змінюється ділянкою, де молекули хоч і розташовуються паралельно, але повернуті безладно по відношенню одна до одної. Ділянки безладдя та порядку можуть багатократно зміняти одна одну. На фотографії,

знятій в електронному мікроскопі, ми бачимо пачки молекул (рис. 10). Тому що ділянки безладдя не такі густі, ніж ділянки порядку, то чергування цих ділянок відбилося на знімку як чергування темних та світлих ділянок.

Багато пластмас побудовано не з лінійних, а з розгалужених молекул. Кожна молекула — це складне дерево, що складається з величезної кількості гілок. Молекули переплутані між собою, як дерева у зрубаному лісі.

За своєю будовою пластмаси є типовим прикладом безладдя в розташуванні атомів.

ЧОМУ СКЛО КРИХКЕ, А ГЛИНА М'ЯКА

Дуже стиснутий тенісний м'яч цілком відновлює свою форму після того, як тиск знято. Найлегший дотик пальців до глини залишає на ній відбиток. Незначний удар розіб'є скло, але нічого не зробить сталі.

Причини такої істотної різниці властивостей тіл ми шукаємо в їх структурі. Опірність тіла стиску, розтягу або вигину залежить від характеру взаємодії його атомів і молекул. Спробуємо насамперед з'ясувати суть основних механічних властивостей — пружності і пластичності. Пружним називається таке тіло, яке відновлює свою форму після того, як сила перестала діяти. До пружних тіл належать, наприклад, сталь і мармур.

Досліди показали, що при розтяганні сталі відстань між кожною парою атомів збільшується, а при стисканні — зменшується. При цьому атоми не міняють своїх сусідів, можна сказати, залишаються в тих самих потенціальних ямах. Просто під дією зовнішньої сили атом відходить від дна потенціальної ями і трохи підіймається по стінці. Як тільки сила перестає діяти, атом повертається на дно потенціальної ями. Щоб тіло мало помітну пружність, стіни потенціальної ями повинні бути досить пологими — тільки в цьому випадку атом удасться «відкотити» від положення рівноваги на значну відстань.

Тепер припустимо, що зовнішня сила, яка діє на тіло, здатна «викотити» атом з потенціальної ями, тобто, інакше кажучи, здатна відірвати його від сусідів. Можливий такий випадок: викотившись із своєї потенціальної ями, атом «скочується» до сусідньої — інакше кажучи, відірвавшись від своїх сусідів, атом перехоплюється іншими атомами. Після того як сила припиняє свою дію, атом «сам собою»

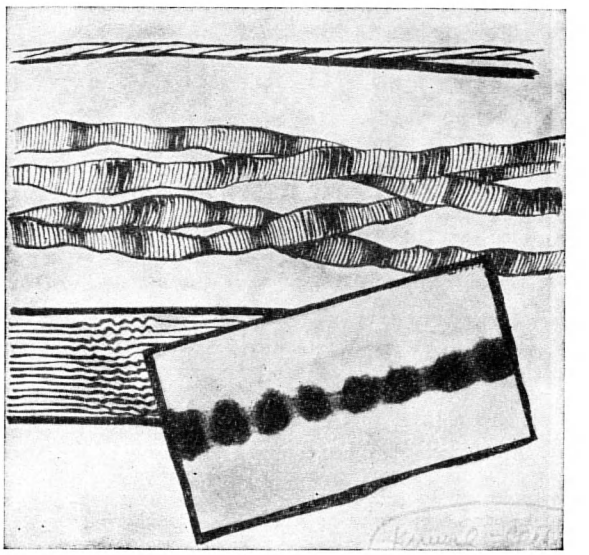


Рис. 10. Нитка капрону складається з витягнутих, злегенька переплутаних пачок молекул-гігантів. Молекули всередині пачки ідуть то в порядку, то безладно. Таке чергування виявляється на фотографії, накладеній на схемі. Ця фотографія одержана з волокна, просоченого йодом. Молекули йоду проникли лише в пухкіші ділянки безладдя і позначили їх.

не може повернутися до попередньої потенціальної ями. Описана картина відповідає властивості пластичності.

Отже, пластичність — це така властивість, при якій атоми однієї частини тіла здатні переміщуватись відносно атомів іншої частини тіла, міняючи своїх сусідів. Як же уявити собі таке зміщення? При пластичному змінюванні форми тіла площини кристала зміщуються, «зісковзуються» одна відносно одної. Ясно, що зісковзування відбувається вздовж тих площин кристала, перпендикулярно до яких діють найслабкіші сили зчеплення. Такі слабкозв'язані площини мають глина, олово, слюда і графіт. У всіх цих тілах можна спостерігати зісковзування однієї частини кристала відносно іншої (рис. 11).

Таким чином, пластичність виникає у тих тіл, атоми яких без особливих труднощів можуть бути виведені зовнішньою силою з своїх потенціальних ям, і, переваливши через край, відразу ж потрапляють до сусідньої ями.

Лишається з'ясувати характер взаємодії атомів, що утворюють крихкі тіла, такі як скло або цегла. В цих тілах потенціальна яма має дуже круті стінки (відсутність пружності), крім того, сусідні ями розрізнені між

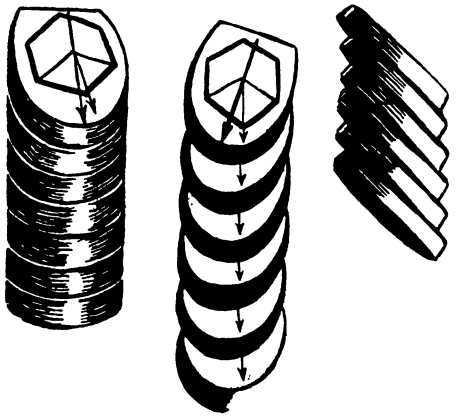


Рис. 11. Пластична деформація кристала полягає в утворенні пачок ківсковзування. Ківсковзування пачки відбувається у випадковому місці (слабкішому), але напрямлення ківсковзування цілком певним способом орієнтоване по відношенню до ребер і граней кристала.

собою широким плато, тому видалений з потенціальної ями атом не потрапляє до сусідньої ями.

Схеми потенціальних ям, що характеризують взаємодію атомів у тілах з різними механічними властивостями, показані на рис. 12.

Було б помилкою припустити, що між крихкими та пластичними тілами немає нічого спільного, що між ними лежить непрохідна прірва. Якщо деякі крихкі матеріали деформувати повільно, то вони поводять себе, як пластичні. Це й зрозуміло: швидкість дії може надати атомам значної кінетичної енергії, і міжатомні зв'язки виявляться розірваними.

Так само кристал може поводити себе і як крихкий, і як пластичний матеріал, залежно від того, як повернуті слабкозв'язані площини до напряму дії сили. Якщо ці площини розташовані впоперек напряму розтягання, то ківсковзування стає неможливим і кристал виявляє крихкість. Якщо площини розташовані вздовж напряму розтягання, то вони будуть ковзати одна по одній, як карти в колоді, і кристал виявить пластичну поведінку.

Особливо заплутаною буде поведінка дрібнокристалічного матеріалу, крихкість або пластичність якого залежить і від властивостей окремих кристаликів, і від їх орієнтації, і від їх зчеплення.

Чудові пружні властивості гуми та каучуку зв'язані із своєрідною будовою цих тіл. У нерозтягнутій гумі пачки молекул згорнуті. Розтягання являє собою розгортання пачок; воно супроводиться поліпшенням бічного порядку в укладанні молекул пачками. Після того як дія сили припиниться, пачки молекул складаються у той самий порядок, в якому вони були до розтягання.

Якщо гума або каучук набули такої зміни форми, яка не знімається після припинення дії сили, то це означає, що молекули, з яких складається пачка, перебудувались і змінили своїх сусідів.

Механічні властивості матеріалів значною мірою залежать від домішок і різних дефектів. Так, сталі, які піддавали різній обробці і які мають дещо відмінні домішки, можуть дуже різко відрізнятися одна від одної. Тому шукання зв'язку властивостей матеріалів з їх структурою являє собою складне і ще досі остаточно не розв'язане завдання, а картини, описані нами вище, претендують лише на те, щоб дати перше уявлення про основні причини різниці у властивостях тіл.

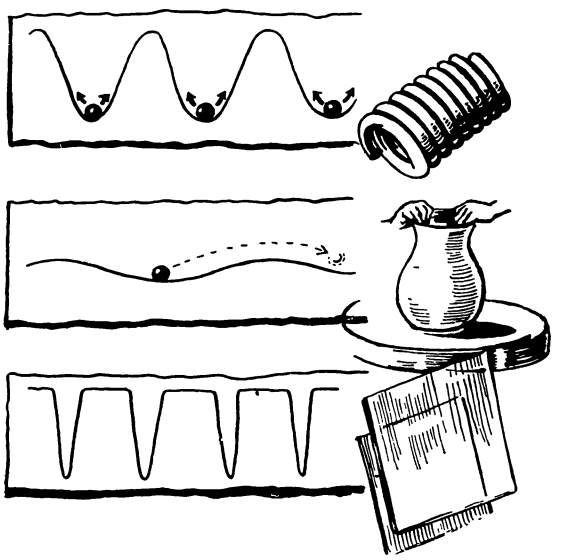


Рис. 12. Схеми, які пояснюють зв'язок механічних властивостей з силами взаємодії між атомами. Вгорі — пружне тіло, всередині — пластичне і внизу — крихке.

ПОДОРОЖ У СВІТ ТЕМПЕРАТУР І ТИСКІВ

Величезні досягнення в найважливіших для людей галузях науки і техніки: електроніці, ядерній фізиці, реактивному русі, космічних польотах — якнайтісніше зв'язані з технікою дуже низьких і дуже високих температур і тисків.

ГЛИБОКИЙ ВАКУУМ

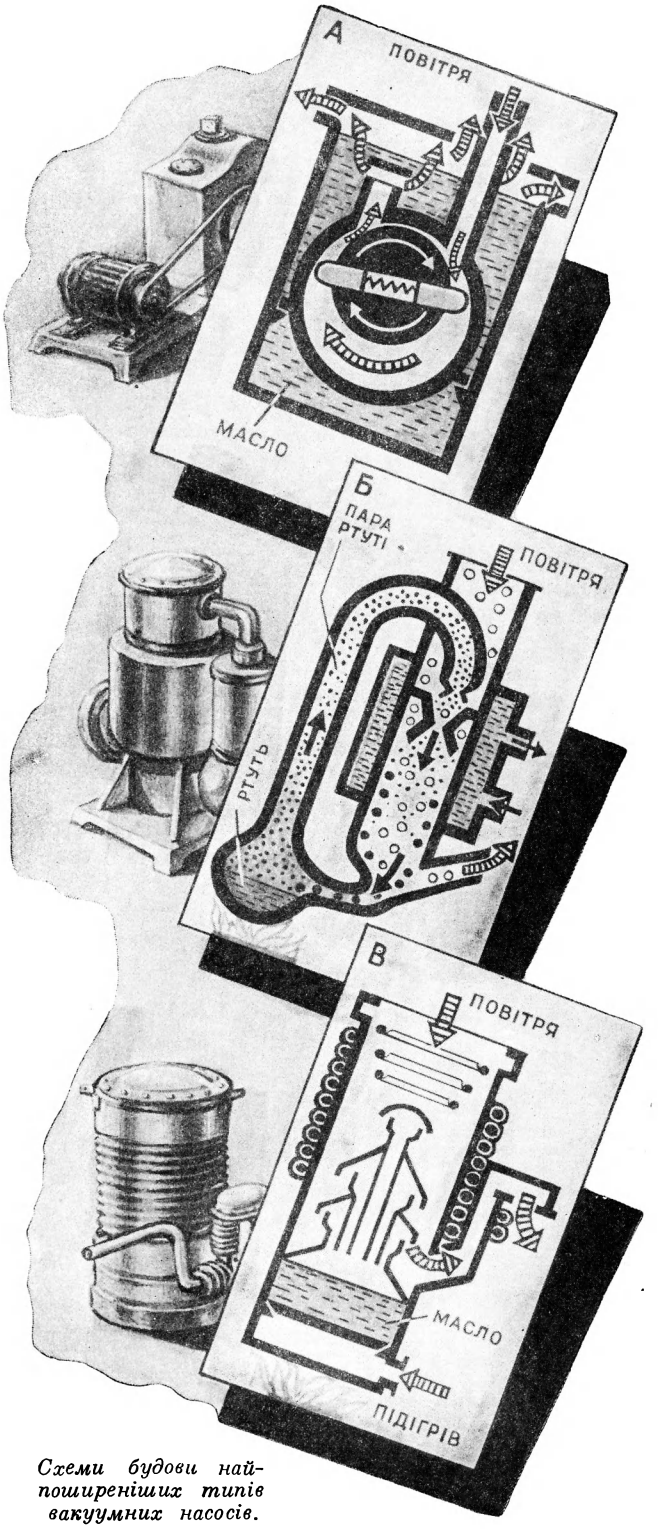
У розпорядженні вчених та інженерів є тепер усе необхідне для того, щоб діставати розрідження (вакуум) в газах, які становлять лише 1/1 000 000 000 000 (10^{-12}) частку звичайного атмосферного тиску. А сучасна електровакуумна хімічна та багато інших галузей промисловості справедливо пишаються тим, що можуть діставати у великих об'ємах і довго підтримувати розрідження, яке дорівнює 10^{-7} *мм* ртутного стовпа. Такий вакуум необхідний для здійснення цілого ряду виробничих процесів.

Проте навіть найкращий вакуум, створений людиною, усе ще далекий від того, який можна спостерігати в природі. У міжгалактичних просторах Всесвіту, далеко від скупчення газів і хмар космічного пилу, на 15—16 $см^3$ простору припадає всього лише одна молекула речовини. У перекладі на тиск це відповідає приблизно $2{,}5 \cdot 10^{-21}$ *атм*. Порівняно з цим навіть шар іонізованих газів — іоносфера, що знаходиться на висоті приблизно від 70 до 400 *км* над поверхнею Землі, надзвичайно «насичена» молекулами: тиск газу в ній становить лише 1/10 000 *атм*.

З вакуумом люди обізналися ще за часів Торрічеллі і Отто Геріке. Отто Геріке — бургомістр м. Магдебурга і вчений — наочно довів своїм співгромадянам, що дві упряжки з 12 коней неспроможні роз'єднати дві щільно притиснуті одна до одної півсфери після того, як з них було викачане повітря. Так міцно ці півсфери удержує вкупі атмосферний тиск.

Низькі тиски довгий час залишались привілеєм лабораторій — доти, поки не були винайдені масляний і ртутний, а потім і дифузійний насоси. Вони саме й проклали глибокому вакууму шлях у промисловість. Їх почали широко застосовувати для викачування повітря з колб освітлювальних ламп, радіоламп, електронних приладів, люмінесцентних, рентгенівських, телевізійних та інших трубок, а також у ряді інших приладів і виробництв. Першим технічним приладом, у якому застосовувався найглибший вакуум, була звичайна електрична лампочка. Генераторні та випрямні електронні лампи, що їх використовують тепер у радіотехніці, рентгенівські трубки та багато інших складних приладів потребують найглибшого («жорсткого») вакууму — порядку 10^{-6} — 10^{-8} *мм* ртутного стовпа. В підсилювальних (приймальних) лампах використовується «м'як-

Знаменитий дослід з «магдебурзькими півкулями».



Схеми будови найпоширеніших типів вакуумних насосів.

А — одноступінчастий ротаційний (обертовий) масляний насос; Б — ртутний (або масляний) пароструминний насос; В — триступеневий дифузійний масляний насос.

ший» вакуум. Газонаповнені електроосвітлювальні лампи, лампи денного світла та інші аналогічні прилади потребують вакууму від 0,1 до 20 *мм* ртутного стовпа. Навіть звичайний термометр — це досить досконалий вакуумний прилад: його викачують до 10^{-3} *мм* ртутного стовпа.

Особливо високі вимоги до вакууму ставить сучасна хімічна промисловість. Питання «життя або смерті» ряду нових галузей хімії залежить від того, чи можна дістати глибокий вакуум у посудинах та установках дуже великих об'ємів. Без нього не можна було б обійтись, наприклад, при деяких процесах перегонки, де застосування високих температур при звичайних тисках безнадійно зруйнувало б одержувані продукти.

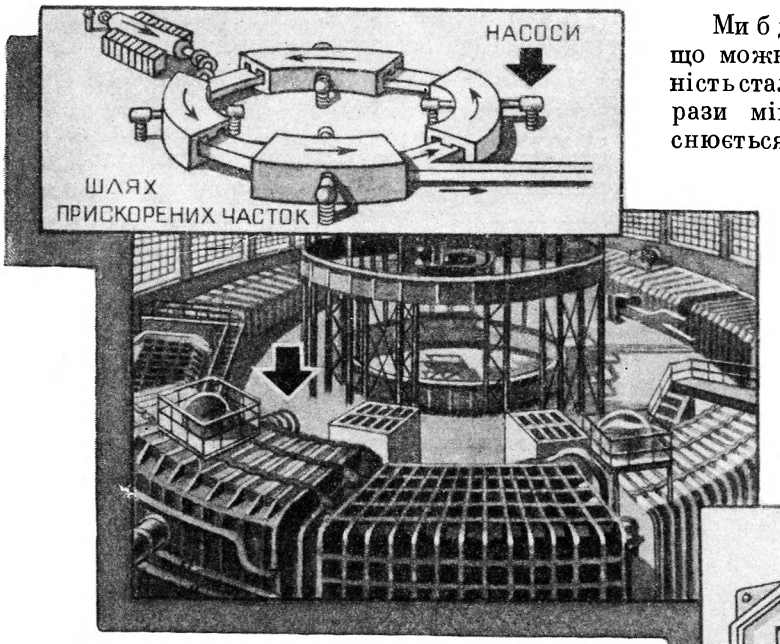
Сучасна ядерна фізика так само залежить від величезної кількості вакуумних приладів та різноманітних вакуумних насосів. У надпотужному радянському синхрофазотроні вакуумна камера об'ємом кілька тисяч кубометрів, всередині якої з величезною швидкістю пролітають ядерні частинки, має тиск, менший від 1/1 000 000 000 *атм*. Вакуумні насоси викачують тут десятки тисяч літрів газу за хвилину.

ВИЩЕ ВІД АТМОСФЕРНОГО

Якщо ми звернемося до області тисків, вищих від атмосферного, то серед повсякденних наших «знайомих» однією з перших зустрінемо автомобільну шину. Її накачують повітрям до тиску в кілька атмосфер.

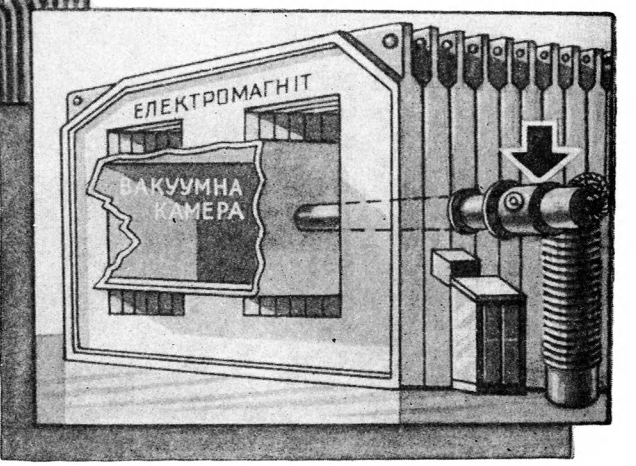
Сучасні парові котли, мабуть, являють собою верхню межу тисків, які тепер можна одержати для промислових цілей на тривалий час і у великих об'ємах. Звичайно вони працюють при тискові 80—100 *атм*, а в найновітніших конструкціях — до 250 *атм*.

Дуже великий тиск, але такий, що триває найкоротший час, люди навчились одержувати давно. Це удари та вибухи. При пострілі з гвинтівки в її стволі розвивається тиск порядку 3—5 тис. *атм*. З величезними тисками ми маємо справу кожного разу, коли проколюємо що-небудь голкою або опускаємо на грамофонну пластинку голку патефона. Тут тиск досягає кількох тисяч *атм* на квадратний сантиметр. Використовуючи енергію напрямлених вибухів, радянські вчені зовсім недавно при зустрічному ударі двох металевих пластин одержали тиск, що дорівнює 5 млн. *атм*.



Ми б дуже здивувалися, коли б нам сказали, що можна дістати мармур, який має пластичність сталі, а найміцнішу сталь зробити ще в 2—3 рази міцнішою на розрив. Проте все це здійснюється при тисках порядку 25—30 тис. *атм*.

Якщо воду, яку піддали такому високому тиску, випустити з апарата тонким струменем, то вона різатиме метал, як масло, і пробиватиме в ньому отвори. А струменем води, що викидається під тиском всього лише в кілька десятків атмосфер можна дробити вугільний пласт. Останнім часом цей спосіб починають застосовувати при видобуванні вугілля.



Для того щоб викачати повітря з гігантської вакуумної камери найбільшого в світі радянського синхрофазотрона, потрібна робота великої кількості вакуумних насосів величезної потужності.

Вимоги, що висуваються цілим рядом галузей сучасної науки і техніки, спонукають учених працювати над вишукуванням способів одержати величезні тиски, що тривають довгий час. Так звана порошкова металургія вимагає тривалих тисків у кілька тисяч атмосфер. Останніми роками для наукових досліджень удалось сконструювати гідравлічні пристрої, які розвивають тиск понад 400 тис. *атм*, правда, в малюсінькій робочій камері. Це зразу відкрило дуже багато найцікавіших можливостей, які раніше навіть важко було уявити.

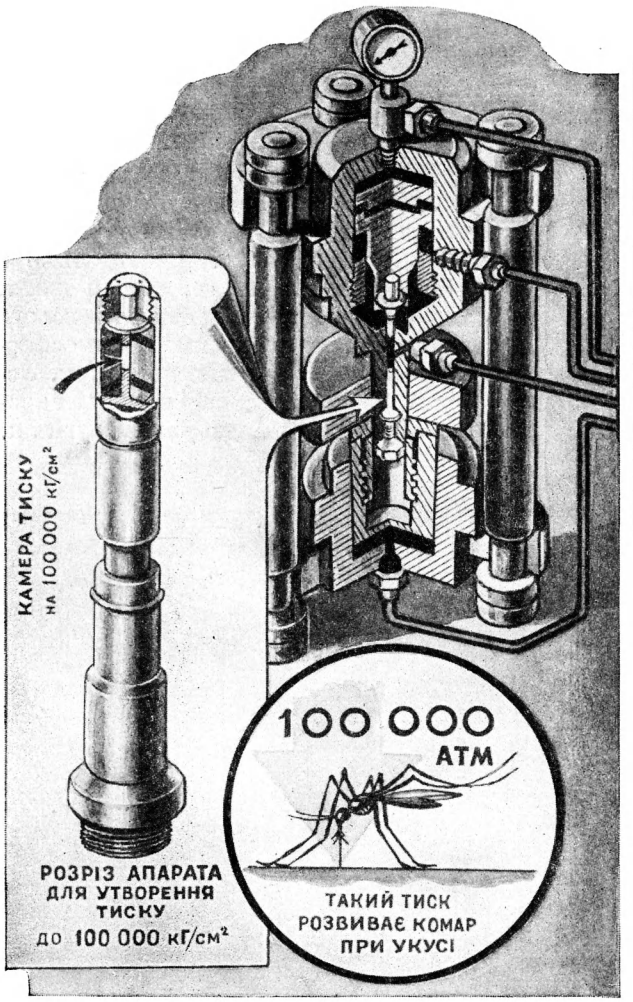
Розповімо лише про деякі з них. Відомо, що при різкому охолодженні гази перетворюються в рідини, які, проте, мають дуже малу густину і тому надзвичайно легкі. При тисках у кілька тисяч атмосфер густина їх дорівнює густині звичайних рідин.

Цікаво, що при таких великих тисках циліндри апаратів з деяких сортів металів раптом починають «потіти»: через пори у їх товстих стінках просочуються краплинки рідини, яка передає тиск компресора.

Тверді тіла піддаються стиску ще важче, ніж рідини. При цьому відбувається ряд цікавих явищ. Жовтий фосфор перетворюється в чорний і залишається таким після того, як знято тиск. Деякі речовини, наприклад папір, стають прозорими. При тиску порядку 100 тис. *атм* і температурі, вищій від 2300°С, із звичайного графіту удалось дістати алмази, правда, поки що дуже дрібні.

Учені надають величезного значення тому, що фізичні властивості твердих тіл можна змінювати за допомогою надвисоких тисків. Зокрема, при сильних тисках можна дістати намагнічення феромагнетика.

Вибух атомної бомби — найпотужніше джерело надвисоких тисків з тих, що є в розпорядженні людини (порядку 1000 млрд. *атм*). Це — єдиний виняток, коли людині, правда, на дуже короткий проміжок часу (менший від однієї мільйонної частини секунди), нарешті, удалось створити на Землі умови, які в природі зустрічаються лише в надрах найгарячіших і найгустіших зірок.



Маленький хоботок комара тисне на поверхню шкіри в силою, що дорівнює десяткам тонн на 1 квадратний сантиметр! Щоб дістати такі ж надвисокі тиски для науково-дослідних і промислових цілей (наприклад, для одержання штучних алмазів), вченим доводиться створювати дуже складні і громіздкі установки.

За винятком небагатьох особливих випадків, високі тиски в природі, як правило, є наслідком високих температур, а високі температури — наслідком високих тисків.

ВОГОНЬ

Одним з найвеличніших відкриттів людини було відкриття способу здобування вогню — перший крок у використанні теплоти. Вогонь забезпечив людину теплом, звільнив її від найпримітивніших форм боротьби за існування.

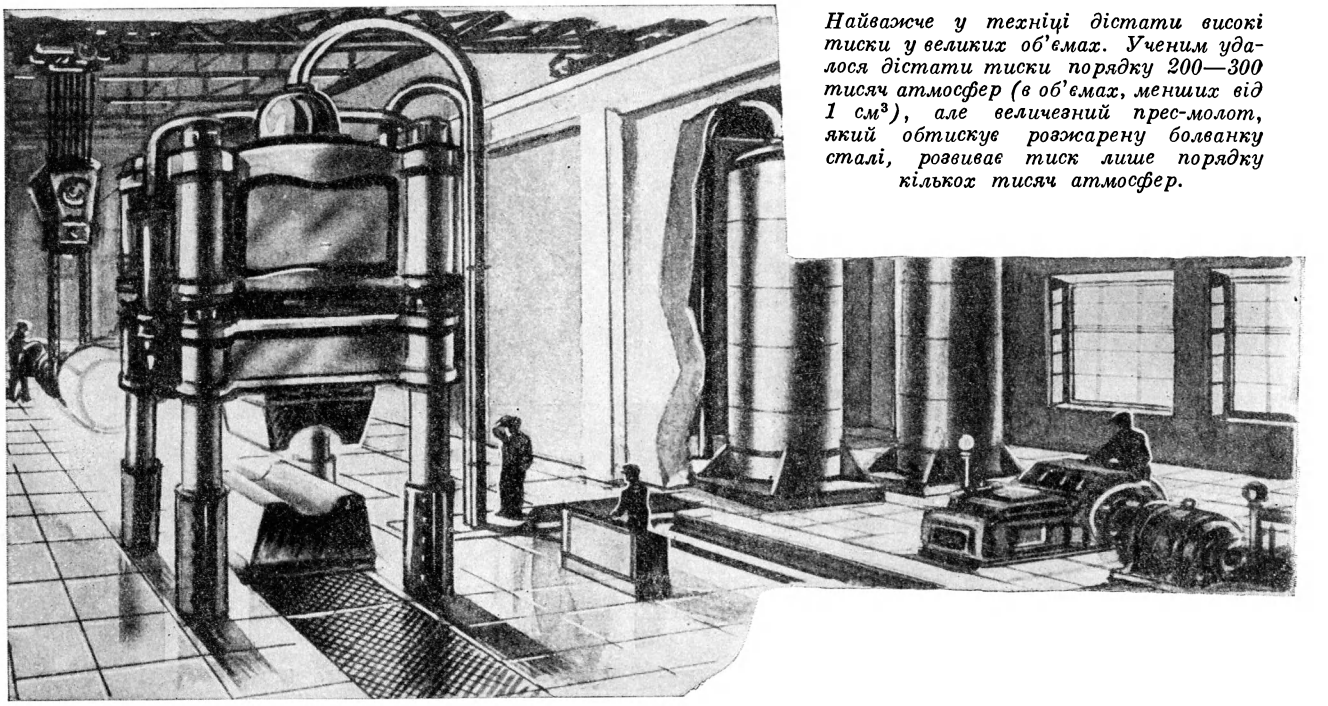
Пізніше вогонь дав можливість людині виплавлювати метали, допоміг їй здобувати та використовувати природне паливо, перетворюючи теплоту спочатку в механічний, а потім і в інші види енергії. Використання вогню допомогло розвиткові мислення людини, народженню наукової думки, культури і мистецтва. А застосування теплоти поклало початок технічному прогресу, ліквідації залежності людства від самої тільки мускульної енергії людей і тварин.

Що ж таке г о р і н н я? Це — хімічна реакція окислення, яка супроводиться виділенням теплоти і може відбуватися майже з будь-якою швидкістю і при будь-якій температурі. Горіння навіть не завжди потребує кисню. Адже деякі метали можуть згоряти в атмосфері азоту.

Якщо горіння супроводиться виділенням газів, то утворюється полум'я. Яскравість його світіння залежить від кількості твердих частинок, що містяться в ньому. Зародившись у середовищі, де відбувається хімічна реакція горіння, полум'я розгоряється і підтримує само себе за допомогою теплоти, яку воно само й розвиває. В свою чергу виділення теплоти підвищує температуру горіння, а остання підвищує швидкість реакції. Так триває доти, поки кількість теплоти, що утворюється, не зрівняється з кількістю теплоти, яка віддається навколишньому середовищу. Але теплота не завжди єдина або навіть головна причина, яка викликає горіння чи вибух. Інша причина — хімічний процес, відомий як н е р о з г а л у ж е н а або р о з г а л у ж е н а л а н ц ю г о в а р е а к ц і я.

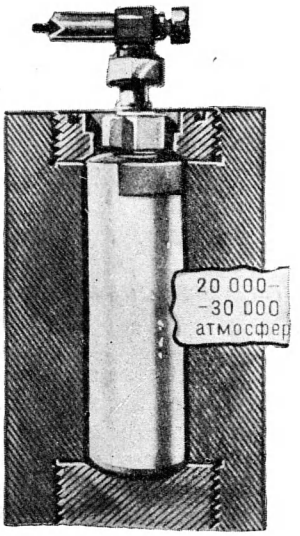
Типовий для горіння процес — це згоряння бензину в двигуні внутрішнього згоряння. Тут паливо, розпорошене і змішане з повітрям, стискується і підпалюється електричною іскрою спочатку в невеликому об'ємі газової суміші. У міру згоряння теплота послідовно поширюється на прилеглі об'єми холодної суміші. Так утворюється зона інтенсивного горіння, яке поширюється в усі сторони, названа х в и л е ю г о р і н н я.

Якщо горюча суміш підводиться до зони горіння безперервно, то хвиля горіння за сприятливих умов може поширитися і проти течії з швидкістю, яка дорівнює швидкості надходження горючої суміші. Прикладом такого горіння може бути стійке полум'я в пальнику газової кухонної плити. Швидкість поширення хвилі горіння називається ш в и д к і с т ю г о р і н н я.



Найважче у техніці дістати високі тиски у великих об'ємах. Ученим удалося дістати тиски порядку 200—300 тисяч атмосфер (в об'ємах, менших від 1 см³), але величезний прес-молот, який обтискує розжарену болванку сталі, розвиває тиск лише порядку кількох тисяч атмосфер.

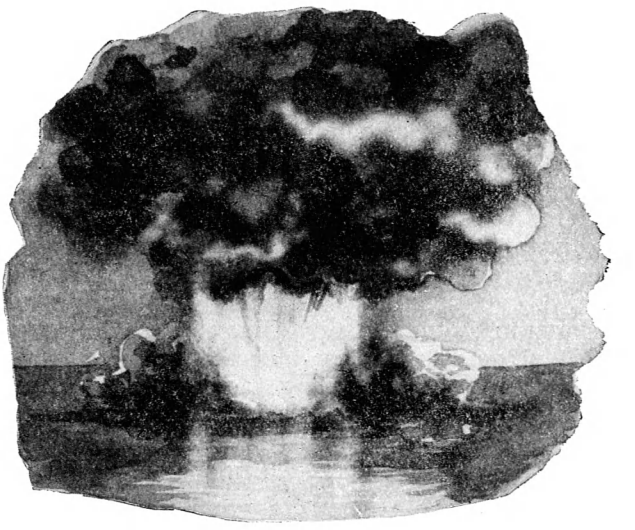
Хвиля горіння, супроводжувана розширенням газу, який міститься в ній, виконує роботу, що викликає різке підвищення тиску в шарах газу, які ще не горять і розташовані перед фронтом хвилі. У суміші, що швидко згоряє і поширюється до того ще вузьким каналом, рух хвилі горіння може набрати характеру ударної хвилі. Такі хвилі поширюються з дуже великою швидкістю. У сильних вибухових речовин, наприклад у толу або нітрогліцерину, тиск фронту ударної хвилі може досягти 100—200 тис. *атм.*



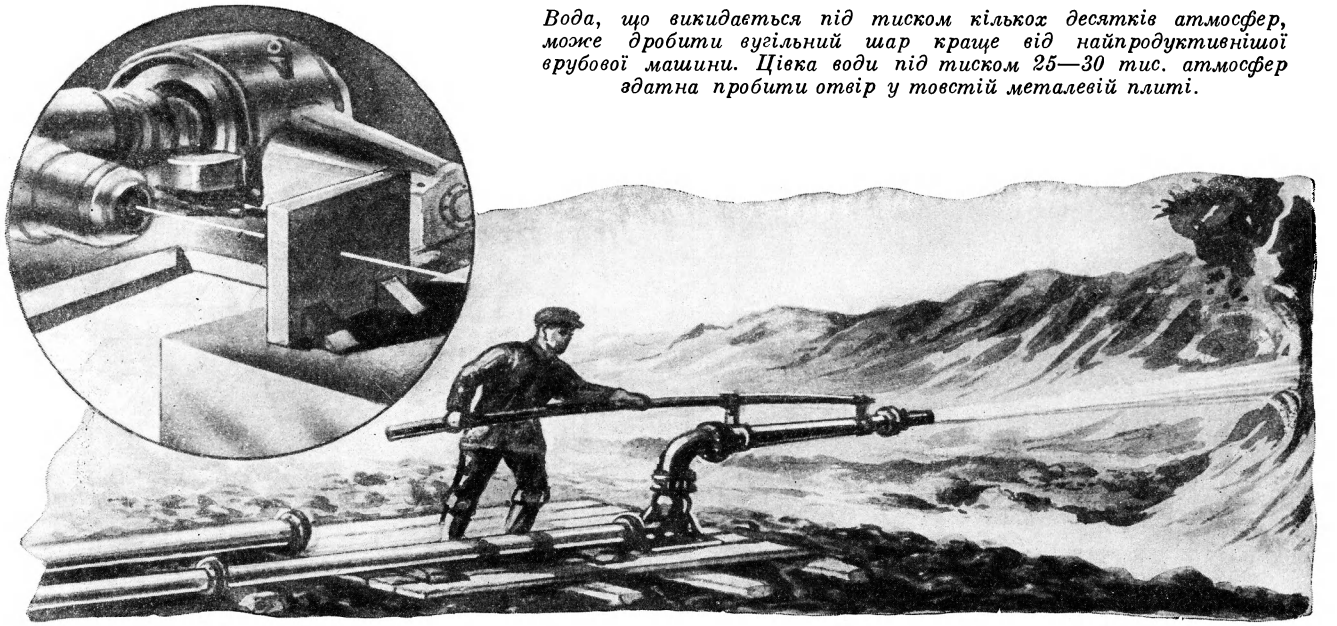
При дуже високих тисках, що їх розвивають сучасні лабораторні установки, застосовуване в них масло може просочитися навіть через дуже товсті стінки стальних циліндрів. Останні починають ніби «потіти».

ТЕПЛОТА І ЖИТТЯ

Ми можемо вирушити в подорож по шкалі температур і тисків у будь-який бік: направитися, наприклад, в область низьких і наднизьких температур. Тут у точці, віддаленій «лише» на 273,16°С від звичного для нас нуля (0°С), знаходиться, як вважають фізики, найнижча межа температури — абсолютний нуль.



Найпотужніше джерело тиску, створене людиною,— атомний вибух, що розвиває мільйон мільйонів атмосфер, триває лише мільйонні частки секунди.



Вода, що викидається під тиском кількох десятків атмосфер, може дробити вугільний шар краще від найпродуктивнішої врубової машини. Цівка води під тиском 25—30 тис. атмосфер здатна пробити отвір у товстій металевій плиті.

Можемо попрямувати і в протилежному напрямі — в бік будь-яких високих і найвищих температур. Подорож у цей бік могла б тривати без кінця. Тут межі навіть теоретично не видно.

Між цими крайностями безмежно великої природної шкали температур загубився малюсінький відрізочок завдовжки лише в 150—200°. У цих межах може існувати біологічне життя, на вершині розвитку якого перебуває людина.

Тому, перш ніж вирушити в таку подорож, затримаємося трохи на цьому «п'ятачку» — скромній ділянці температур, скупо відведеній нам природою для життя. Уся величезна різноманітність живої природи вмістилася б тут буквально на «вістрі ножа» — в межах від 0 до 50°С. Лише дуже небагато організмів можуть більш-менш тривало існувати при температурах, нижчих або вищих від цих меж.

Є, однак, кілька вартих уваги винятків. Наприклад, на Алясці існує комаха веснянка, яка цілком нормально розмножується при температурі 0°С. Відомі різновидності бактерій, яких можна багато разів заморожувати до температури порядку —150°С і тримати в такому стані місяцями. Після розморожування вони оживають, нібито з ними нічого особливого і не сталося. Ціла група бактерій і рослин (наприклад, світні бактерії, спори моху, насіння деяких рослин) виживають навіть після перебування при температурі —268°С.

Такі експерименти, звичайно, не можна проводити над вищими організмами. Проте добре відомо, що у тварин, які проводять зиму в сплячці, температура тіла різко знижується, а життєдіяльність організму та обмін дуже сповільнюються. Так, молоді білі миші оживали після охолодження до —2,78°С, після того як усі видимі ознаки життя в них, включаючи биття серця, зникали.

Останніми роками лікарі-хірурги наважились піддати глибокому охолодженню і організм самої людини в тих випадках, коли їй загрожує загибель від інших, небезпечніших причин.

Відомо, що в ряді випадків лікарям удавалось оживити людину і після так званої клінічної смерті, але з одним застереженням: якщо проміжок часу після неї не перевищує кількох хвилин. Чому ж така коротка ниточка, що відділяє життя від смерті? Виявляється, що справа дуже складна. Найтонші клітини головного мозку тварини й людини необоротно гинуть уже через кілька хвилин після припинення припливу кисню, який переносить течія крові.

І тут на допомогу лікарям прийшов холод. Якщо при зниженні температури тіла тварини всі її життєві процеси та обмін сповільнюються, то й споживання кисню клітинами мозку при цьому повинно так само різко скоротитися, не спричиняючись до їх неминучої загибелі. Поки що перші сміливі досліди дали багатонадійні

результати. Приспана, а потім і охолоджена до температури 25—27°С людина поверталась до нормального життя навіть через 20—25 хвилин після повного припинення кровообігу — час, в ряді випадків достатній для врятування її життя. І це тільки перші кроки в новій галузі медицини — г і п о т е р м і ї!

У дії тепла на живі організми проявляються певні суперечності. У помірному ступені тепло підвищує і прискорює життєві процеси, благотворно впливаючи на ріст і розмноження організмів. Та коли температура перевищує ці не такі вже віддалені межі, життя виявляється набагато уразливішим. Але й тут є винятки!

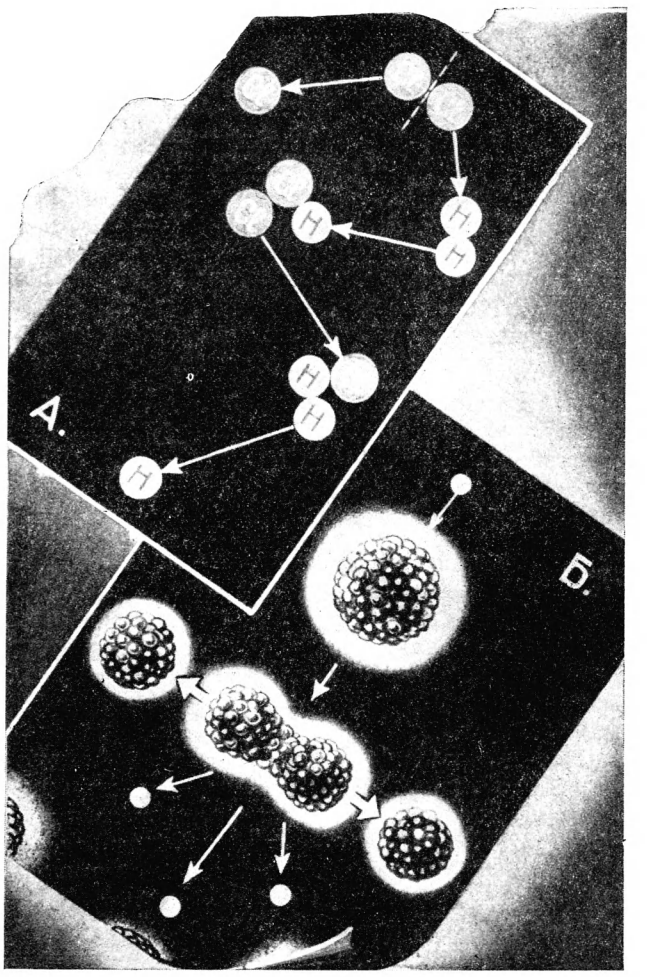
У білих мишей температура тіла дорівнює 39°С, а у деяких співочих птахів — навіть 45°С. З усіх тварин найбільш стійка порода риб, які живуть в гарячих джерелах острова Цейлону. Ці риби мають температуру близько 50°С. А «найгарячіші» організми можна знайти в світі бактерій і рослин. Деякі форми таких організмів нормально існують при температурі 70°С і вище. А багатьох удається вбити тільки при тривалому кип'ятінні.

У гарячих джерелах можна знайти синьозелену водорость, яка виживає при 85°С, а бактерії, які живуть у глибоких нафтових шарах, ведуть «кипуче» життя при температурах навіть понад 100°С.

Тут, звичайно, слід відрізняти температуру, властиву тривалій життєдіяльності організму, і тимчасову температуру, яку той чи інший організм може перенести при деяких умовах. Тут також не йдеться про ті засоби, які застосовує людина в боротьбі з дуже низькою і високою температурою (одяг, житло, опалення, охолодження і т. п.).

Відомий полярний дослідник Нансен не раз казав, що людина може звикнути до будь-яких тягот життя, але тільки не до холоду. Спеку людина переносить значно легше.

У деяких випадках це може здатися навіть неправдоподібним. Якийсь час на Заході був поширений цирковий атракціон, який викликав інтерес не тільки у глядачів. Людину поміщали в дуже гарячу піч з шматком м'яса. Через деякий час вона виходила звідти неушкодженою, тримаючи в руках засмажене м'ясо. У 1828 р. якийсь Гудіні в Лондоні в присутності вчених витримував у печі температуру 102°С. У 1867 р. інша людина, Чаберт, здійснював цей дослід вже при температурі 193°С.



Два види ланцюгових реакцій: А — хімічна, Б — ядерна.

Коли він дихав на термометр, ртуть у ньому знижувалась! При обмацуванні тіло його здавалось холодним, як лід. У той самий час дотикатися до металевих предметів всередині печі було небезпечно — можна було дістати тяжкий опік.

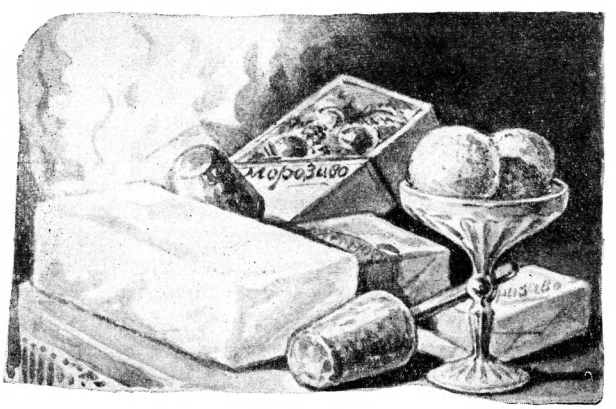
Секрет такої «жаростійкості» людини полягав у тому, що, як правило, у піч вона входила одягнутою в товстий шерстяний одяг, який забезпечував швидку появу рясного поту. Випаровуючись, піт надійно захищав організм від згубного перегріву при такій високій температурі. А при температурі до 130°С можна було обійтись і без такого одягу. За останніми даними, людина в легкому одягу може витримати температуру до 200°С, а в щільному одягу навіть до 260°С.

НА ПІДСТУПАХ ДО АБСОЛЮТНОГО НУЛЯ

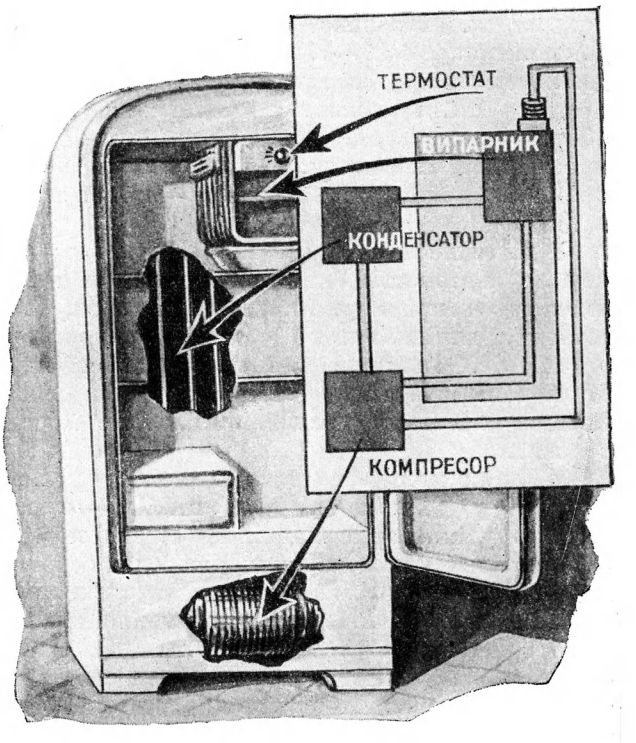
Мандрівка в область дуже низьких температур — до абсолютного нуля — напочатку не віщує ніяких особливих несподіванок або таємниць. Температури приблизно до мінус 40—60 °С практично цілком віддані техніці холодильної справи. Вона забезпечує людей свіжими, здоровими харчами, очищеним охолодженим і зволоженим повітрям, зберігає високу стерильність медичних препаратів та ліків. Далі йдуть області, при яких усі речовини, рідкі при звичайних температурах, стають твердими, а газоподібні — рідкими. І, нарешті, область, в якій гази, що перетворилися в рідину, можна охолодити вже до твердого стану. При температурі —39°С замерзає в термометрах ртуть, при —78,5°С вуглекислота (CO_2) перетворюється в димучу речовину — сухий лід, і, нарешті, при —114,2°С замерзає спирт.

Тут звичайно переходять на іншу шкалу вимірювання температур. У повсякденному житті ми настільки звикли вважати 0°С точкою замерзання води, а 100°С — точкою її кипіння, що всяка температура, нижча від нуля, нам здається «холодом», в той час як в дійсності і 10 і 100°С нижче від точки замерзання води однаково ще «тепло», бо попереду ще багато зустрінеться точок замерзання різних інших рідин. Тому відлік температур ми будемо провадити від а б с о л ю т н о г о н у л я. Його позначають 0°К (градуси Кельвіна), на відміну від градусів Цельсія.

У цьому випадку наш звичний 0°С дорівнюватиме +273,16°К.



Не настільки вже холодні продукти — морозиво, заморожені фрукти — заморожуються за допомогою «сухого льоду» — вуглекислоти, охолодженої до —79°С.



Так побудований найпростіший апарат для одержання порівняно невеликих низьких температур — кімнатний холодильник (до —5°С).

Технічне застосування низьких температур стало можливим головним чином після винайдення промислових способів добування зріджених газів: повітря, азоту, кисню, водню і гелію. Причому тут є два головних шляхи: перший — добування завдяки зрідженню газів низьких температур, другий — наукове і промислове використання самих зріджених газів або охолоджених речовин.

Яким способом удалось привести в рідкий стан повітря? Адже в нашому повсякденному уявленні, щоб охолодити будь-яку речовину, необхідно помістити її в середовище з ще нижчою температурою, наприклад, поставити на лід або в холодильник. У спеціальних установках — машинах холоду — це робиться дещо інакше.

Давно було відомо, що при швидкому стисканні газ нагрівається. На це, природно, витрачається деяка кількість енергії. А тепер спробуємо такий стиснутий і нагрітий газ охолодити до кімнатної температури, а потім дати йому можливість розширитися, виконуючи при цьому яку-небудь роботу, наприклад, обертаючи турбіну або приводячи в рух поршень.

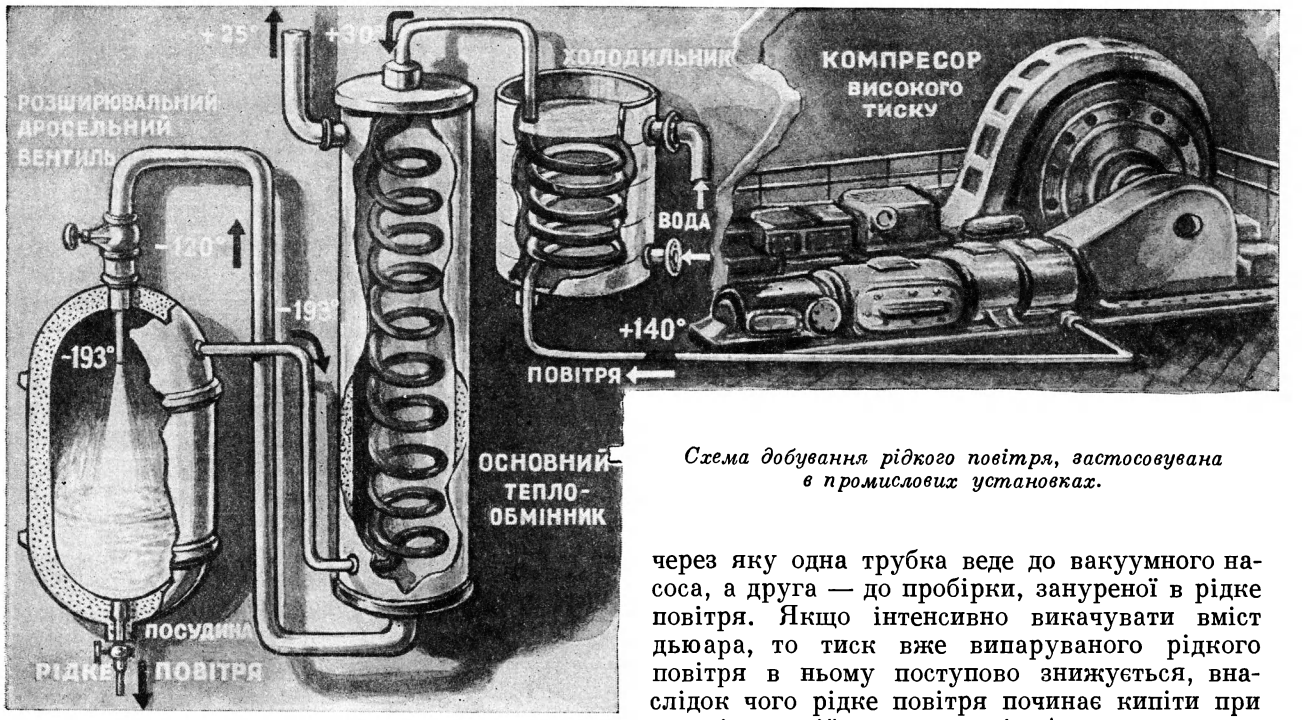


Схема добування рідкого повітря, застосовувана в промислових установках.

Ця робота може здійснитися тільки за рахунок енергії теплового руху. В результаті цього температура газу знизиться. Частину охолодженого таким способом газу можна в свою чергу використати на охолодження залишеної порції стискуваного ще раз газу. Останній, знову розширяючись під час роботи, створить ще нижчу температуру і т. д. — доти, поки остання порція газу не охолодиться до рідкого стану. Перетворене в рідину повітря, опинившись під звичайним атмосферним тиском, кипить при температурі близько 81°К (—192°С).

Щоб добути ще нижчі температури, застосовують інший метод. Альпіністи добре знають, що чим нижчий тиск, тим швидше закипає рідина. Те саме відбувається і з рідким повітрям: при зниженому (проти атмосферного) тиску воно закипає уже не при 81°К, а при 75—70°К і навіть нижче. Схема холодильного пристрою, який грунтується на цьому принципі, виглядає приблизно так.

Рідке повітря поміщають у «дьюарі» — скляній посудині, яка має подвійні стінки. Її назвали так ім'ям винахідника — французького фізика Дьюара. З простору між стінками викачано повітря, а внутрішні поверхні їх посріблено, завдяки чому зведено до мінімуму доступ теплоти іззовні. Посудину заповнено рідким повітрям і герметично закрито кришкою, через яку одна трубка веде до вакуумного насоса, а друга — до пробірки, зануреної в рідке повітря. Якщо інтенсивно викачувати вміст дьюара, то тиск вже випаруваного рідкого повітря в ньому поступово знижується, внаслідок чого рідке повітря починає кипіти при дедалі нижчій температурі. А коли так, то будь-який газ, що надходить іззовні в занурену в рідке повітря пробірку, охолоджується вже нижче від тієї температури, при якій кипить рідке повітря при нормальному атмосферному тиску.

Якщо замість рідкого повітря взяти рідкий кисень, що кипить при температурі 90,16°К (—183°С), то можна знизити температуру всередині пробірки ще більше і перетворити в рідину водень, температура кипіння якого 20,36°К (—252,8°С). Відкачуючи пару рідкого водню при температурі —259,2°С (13,96°К), удалось добути твердий водень.

Аналогічно можна перетворити в рідину і газоподібний гелій при температурі —268,9°С (4,26°К). В установках іншого роду при тиску понад 25 *атм* можна добути твердий гелій, температура якого досягає —271,9°С, або 1,26°К, і проте до абсолютного нуля залишається так нескінченно далеко, що вчені давно дійшли висновку про практичну недосяжність цієї температурної точки.

Для добування температур, нижчих від 0,7°К, рідкий гелій уже непридатний. Довелося ще раз змінити методику і вдатися до так званого методу адіабатичного розмагнічування. При намагнічуванні деяких парамагнітних солей (наприклад, залізоамонієвого або хромокалієвого галуну),

спочатку охолоджених до дуже низької температури (0,7°К), виділяється значна кількість теплоти. Якщо відвести теплоту, яка виділилася, а потім розмагнітити сіль, то температура її різко спадає до величини, віддаленої лише на кілька стотисячних часток градуса від абсолютного нуля. Механізм цього явища наближено можна з'ясувати тим, що частина енергії теплового руху зв'язана з обертанням атомів парамагнітної солі, які являють собою ніби надмікроскопічні магнітики, а частина енергії — з тепловими коливаннями цих атомів у кристалічній решітці солі. При намагнічуванні солі сильним зовнішнім магнітним полем відбувається ніби насильне перемагнічування обертових атомів-магнітиків, що встановлюються вздовж ліній цього зовнішнього поля. А це різко гальмує їх тепловий рух. Теплота, що виділяється при цьому, відводиться із солі охолоджуючим середовищем. Коли ж зовнішнє магнітне поле зникає, атоми-магнітики знов набувають волі руху, черпаючи потрібну для цього енергію з енергії коливального руху атомів кристалічної решітки. Значне зменшення розмаху коливань атомів решітки і виявляється в різкому зниженні температури солі.

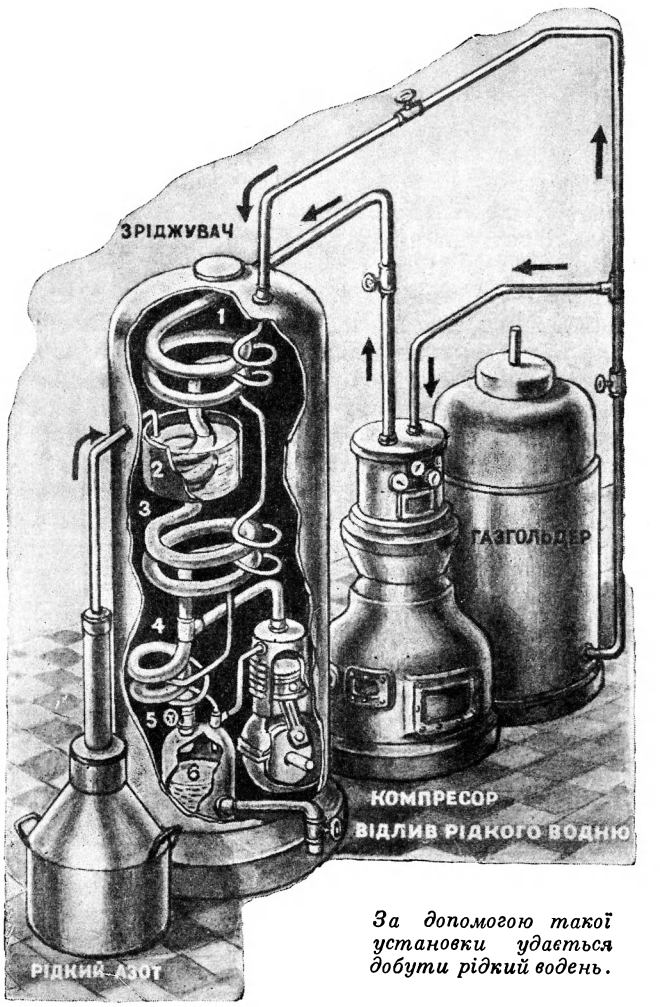
Важко перерахувати всі технічні та наукові області застосування низьких температур, створюваних за допомогою рідкого повітря, азоту, кисню, водню й гелію, і в першу чергу області застосування самих цих зріджених газів. Рідке повітря, наприклад,— сильна вибухова речовина, рідкий азот — добра сировина для виробництва штучних добрив. Рідкий кисень — дуже активний окислювач численних видів палива. Рідкий водень і гелій широко застосовуються для наукових досліджень, починаючи з вимірювання температур надвіддалених зірок і галактик в особливо чутливих приладах — болометрах — і кінчаючи ядерними дослідженнями в «бульбашкових» камерах для виявлення елементарних частинок (див. стор. 525).

Але найбільший інтерес мають дослідження в галузі так званої надпровідності. Суть її полягає в тому, що при температурах, віддалених лише на кілька градусів від абсолютного нуля, у ряді речовин опір проходженню через них електричного струму раптово цілком зникає.

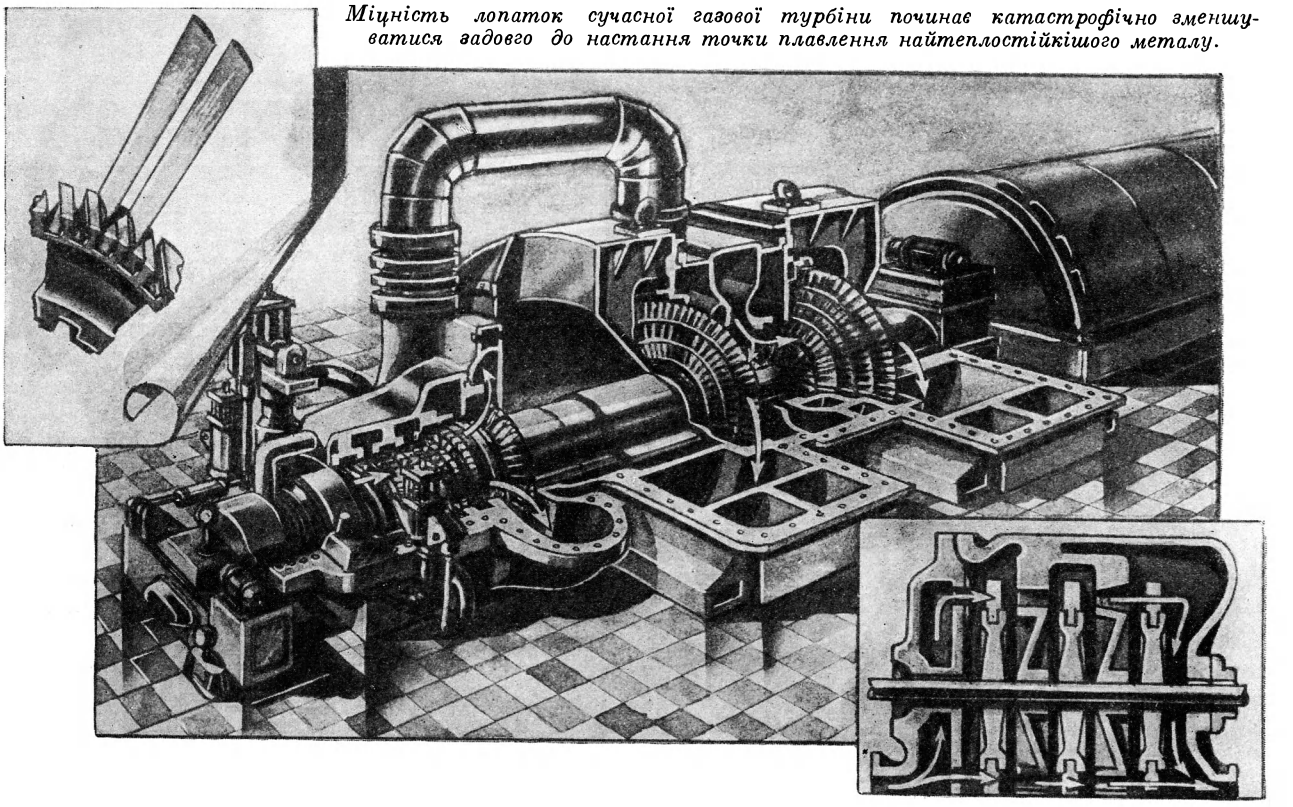
Значення цього явища для техніки дуже велике. Величезна кількість енергії марно пропадає скрізь і всюди, де застосовується електричний струм, починаючи від кишенькового ліхтарика і кінчаючи потужними електричними двигунами. Значна частина енергії, яку направляє Волзька ГЕС імені В. І. Леніна в Москву, витрачається на подолання електричного опору проводів майже тисячокілометрової лінії передач. І будь-які зусилля вчених та інженерів не дають істотного зниження цих неминучих втрат.

Тепер уявіть собі, що електричний опір проводів, машин, ліній передач раптом зник. Це означало б збільшення на 20—30% усіх енергетичних ресурсів людства, багатомільярдну економію матеріальних засобів — мета, явно варта будь-яких витрат на досліди та експерименти.

Звичайно, до виготовлення багатокілометрового надпровідного кабеля, заповненого рідким воднем або гелієм і з'єднуючого, припустимо, потужну електростанцію з Москвою, поки що дуже далеко. Проте цілий ряд лабораторних



За допомогою такої установки удається добути рідкий водень.



Міцність лопаток сучасної газової турбіни починає катастрофічно зменшуватися задовго до настання точки плавлення найтеплостійкішого металу.

пристроїв і приладів, виготовлених із надпровідних речовин, занурених у рідкі гази, використовується вже тепер. Роблять, наприклад, спроби застосувати такі прилади для особливо чутливих електричних вимірювань у коротких відрізках кабелів між антеною та підсилювальним пристроєм радіотелескопа або між передавачем і антеною потужної радіолокаційної станції. Різке зменшення електричного опору цих ланцюгів у багато разів збільшує чутливість всіх таких установок.

А тепер з царства абсолютного нуля повернемося до звичного нуля за шкалою Цельсія і вирушимо в тривалішу подорож — в область позитивних температур.

ЯК ЗАТРИМАТИ ТЕПЛОТУ

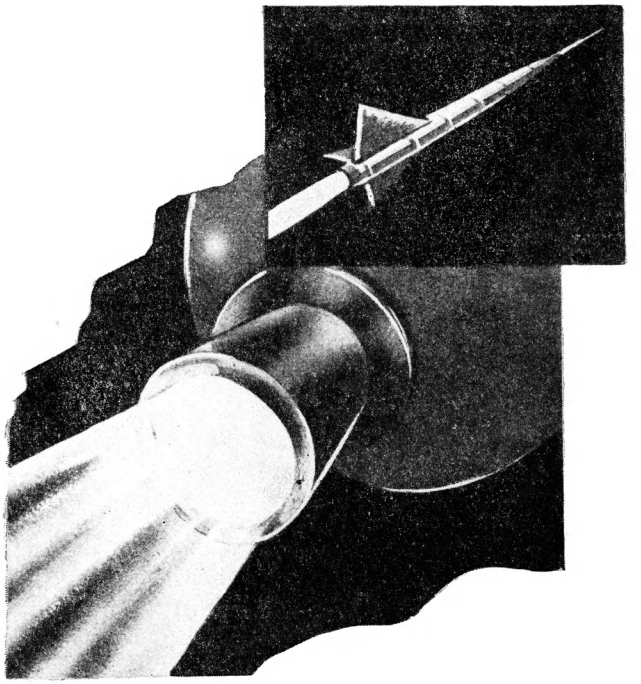
У розпорядженні вчених та інженерів є цілий ряд способів одержання високих і навіть надвисоких температур. Але головна перешкода для широкого використання теплоти в науці і техніці досі полягає в проблемі винайдення матеріалів, здатних удержувати цю теплоту.

Коефіцієнт корисної дії теплових машин, які перетворюють теплоту в енергію механічного руху, збільшується лише із збільшенням різниці температур між нагрівником і холодильником[1]. Багато в чому він обмежується жаростійкістю матеріалів, куди треба вміщувати носій теплоти — газ, що горить, або нагріту рідину.

Які температури повинні витримувати ці матеріали? Тут слова «високі температури» мають різне значення. Для конструктора парової турбіни це буде 650—700°С, для конструктора газової турбіни — 1000—1200°С, для конструктора ракет — 1200—2000°С і вище.

Значить, насамперед вони повинні мати гранично високу точку плавлення. Але з усіх елементів, що входять у періодичну таблицю Менделєєва, лише якихось два десятки мають точку плавлення, вищу від 1600°С. Температура плавлення — це властивість тієї чи іншої речовини, яку ми неспроможні змінювати ні механічною обробкою, ні іншим фізичним впливом. На щастя, можна створювати сплави і хімічні

[1] Докладніше про це див. у ст. «Фізичні принципи роботи теплових машин».



Застосування металокерамічних матеріалів, виготовлених методом порошкової металургії, дало можливість значно збільшити робочі температури сучасних ракетних двигунів.

сполуки, які мають значно вищі точки плавлення, ніж речовини, що входять у них, взяті нарізно.

Зрозуміло, ці матеріали повинні зберігати відповідну механічну міцність при найвищих температурах, гранично близьких до їх точки плавлення. Але в переважній більшості випадків міцність починає зменшуватися вже при кімнатній температурі, спочатку повільно, а потім, із зростанням температури, дедалі швидше. Наприклад, міцність лопатей ротора турбореактивного авіаційного двигуна, що роблять більше 15 тис. *об/хв* і виготовлені з найбільш жароміцної сталі, катастрофічно наближається до небезпечної границі міцності вже при температурі 600°С. Але ж при дуже високих температурах такі матеріали повинні бути ще й хімічно інертними, тобто не вступати ні в які хімічні реакції з рідиною або газом, з якими вони стикаються під час роботи.

У цих умовах зразу ж відпадають такі метали, як алюміній, магній, цинк, свинець та сплави з них. Адже у них дуже низькі точки плавлення. Порівняно високі температури плавлення мають титан, нікель, марганець, хром і кобальт. Невеликі домішки цих елементів дають можливість одержувати сталі з добрими фізичними властивостями при високих температурах.

Тому вчені-металурги безперервно прагнуть створювати для теплових і реактивних двигунів нові сплави, які мають дедалі більшу жароміцність. Та як тільки вони створять жароміцну марку сталі, інженери в своїх конструкціях зразу ж підвищують робочу температуру і тиск пари або газу і знову вимагають ще більш жаростійких сплавів.

Визначних успіхів у цій галузі металургії було досягнуто після того, як основою сучасної швидкісної авіації став реактивний двигун. Менш ніж за десять років робочі температури в газовій турбіні зросли від 650 до 900°С і вище. Дальше збільшення робочих температур газових турбін було вже відносно повільним. Очевидно, для всіх таких сплавів границя робочих температур лежить десь в області 980—1000°С.

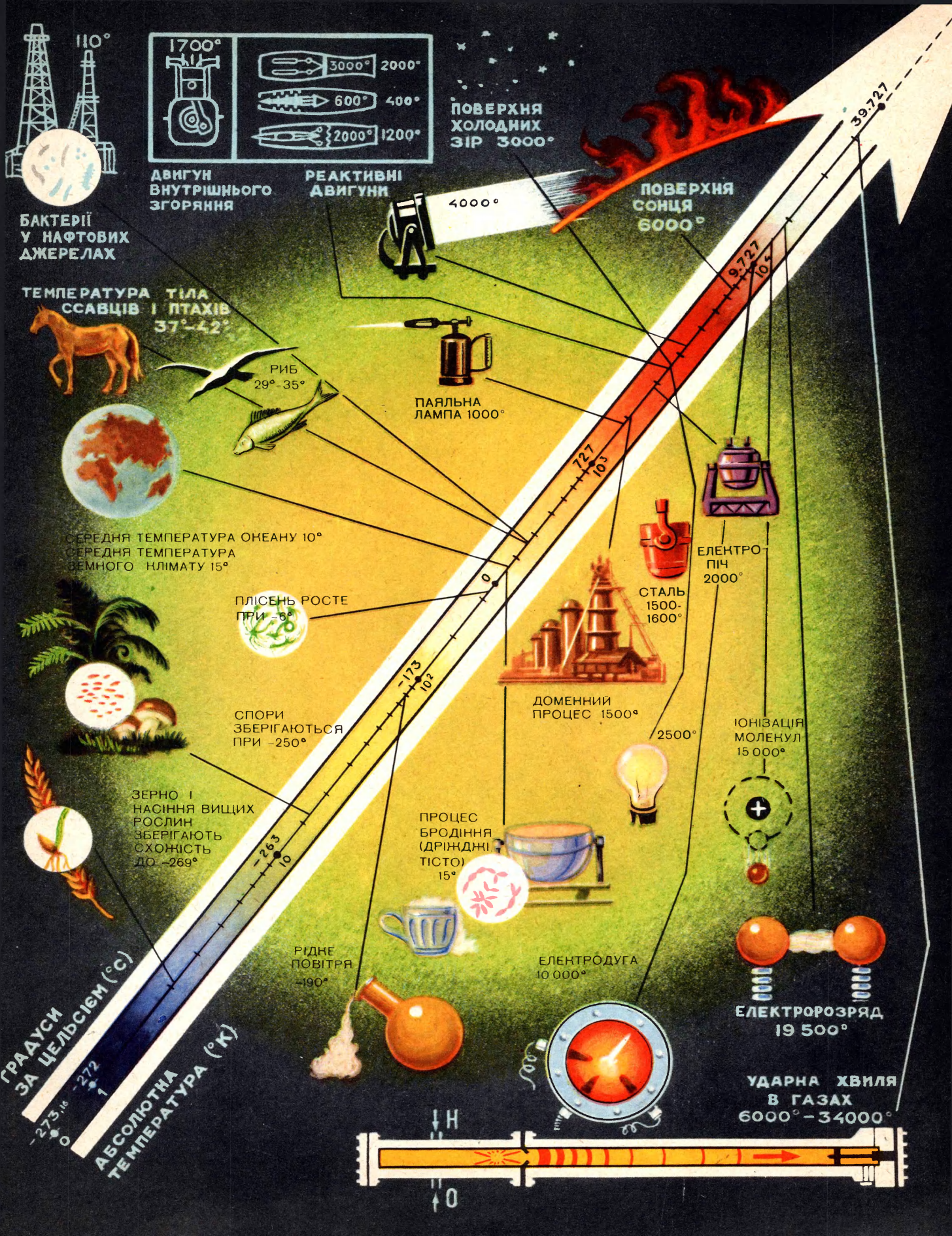
Тому на зміну металевим сплавам прийшли керамічні — неметалеві — матеріали. Вони являють собою сполуки металів з іншими речовинами—киснем (оксиди), вуглецем (карбіди), азотом (нітриди), бором (бориди) і т. д.

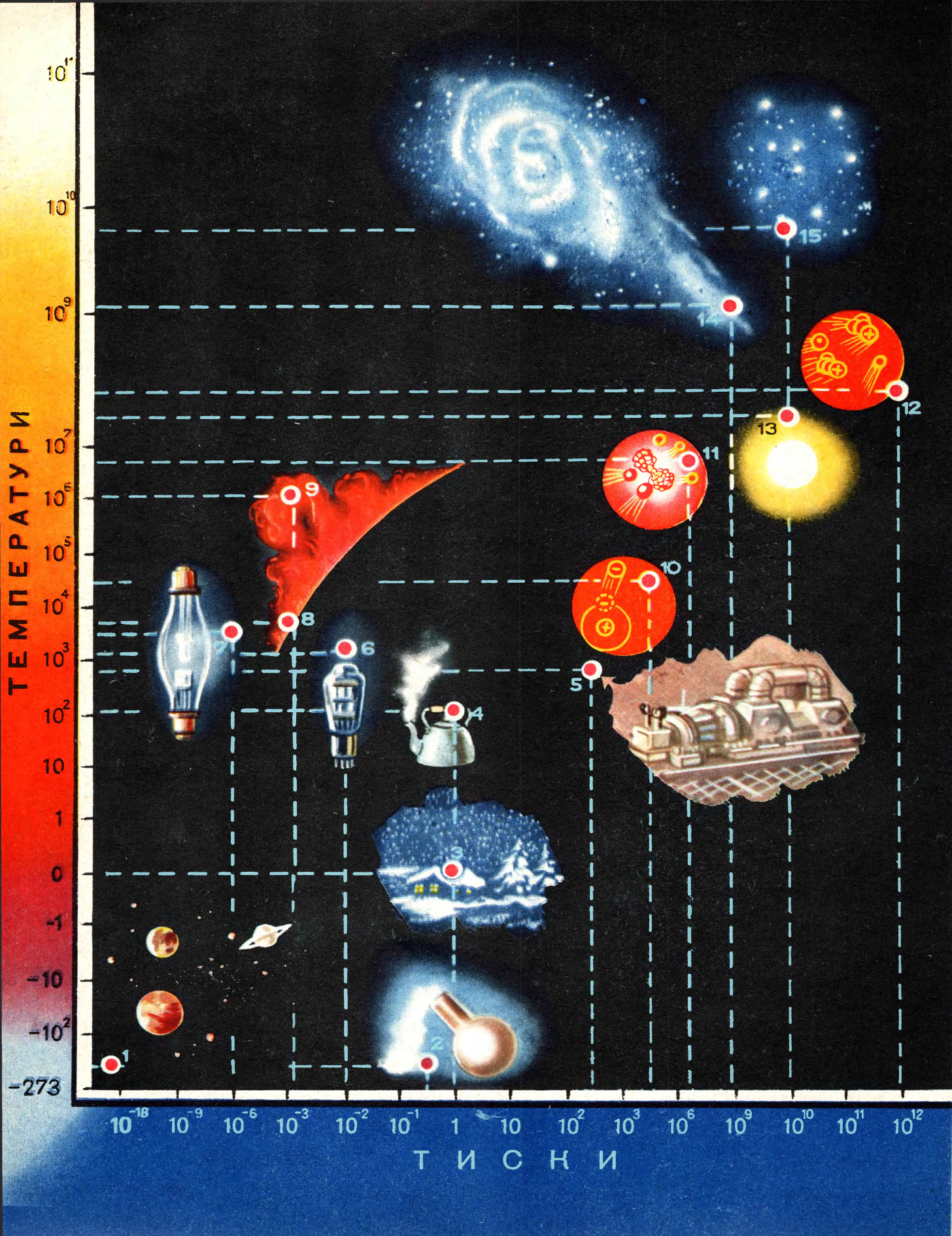
Основна позитивна якість цих матеріалів — дуже висока температура плавлення. Керамічні оксидні матеріали цілком вільні від небезпеки окислення, властивій майже всім металам. Та зате вони дуже крихкі і дуже чутливі до різних змін температури. Керамічні ж карбіди, нітриди й бориди мають порівняно добрі металеві властивості, але схильні до окислення. І тут, очевидно, треба знайти якийсь компроміс між високою механічною міцністю і недостатньою хімічною інертністю цих матеріалів у дуже окислюючій атмосфері.

Цей компроміс тепер здійснюється у так званих металокерамічних матеріалах (кермети), які виготовляються із суміші керамічних та суто металевих порошків. Але вдало сконструювати машини з таких матеріалів, безперечно, надзвичайно важко. Вихід тут полягає ось у чому.

Відомо, що матеріали, які дуже нагріваються, коли їх досить енергійно охолоджувати,

Таблиця 19. Температури в градусах Цельсія (°С) і абсолютної шкали (°К), при яких можуть існувати живі організми і відбуваються фізичні явища, що створюються людиною або існують у природі.


110°
БАКТЕРІЇ У НАФТОВИХ ДЖЕРЕЛАХ
1700°
3000°
2000°
600°
400°
2000°
1200°
ДВИГУН ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ
РЕАКТИВНІ ДВИГУНИ
ПОВЕРХНЯ ХОЛОДНИХ ЗІР 3000°
4000°
ПОВЕРХНЯ СОНЦЯ 6000°
39727
9727
10⁴
ТЕМПЕРАТУРА ТІЛА ССАВЦІВ І ПТАХІВ 37°–42°
РИБ 29°–35°
ПАЯЛЬНА ЛАМПА 1000°
727
10³
ЕЛЕКТРО-ПІЧ 2000°
СТАЛЬ 1500-1600°
СЕРЕДНЯ ТЕМПЕРАТУРА ОКЕАНУ 10°
СЕРЕДНЯ ТЕМПЕРАТУРА ЗЕМНОГО КЛІМАТУ 15°
ПЛІСЕНЬ РОСТЕ ПРИ –6°
0
–173
10²
ДОМЕННИЙ ПРОЦЕС 1500°
2500°
ІОНІЗАЦІЯ МОЛЕКУЛ 15 000°
СПОРИ ЗБЕРІГАЮТЬСЯ ПРИ –250°
ЗЕРНО І НАСІННЯ ВИЩИХ РОСЛИН ЗБЕРІГАЮТЬ СХОЖІСТЬ ДО –269°
–263
10
ПРОЦЕС БРОДІННЯ (ДРІЖДЖІ ТІСТО) 15°
РІДКЕ ПОВІТРЯ –190°
ЕЛЕКТРОДУГА 10 000°
ЕЛЕКТРОРОЗРЯД 19 500°
ГРАДУСИ ЗА ЦЕЛЬСІЄМ (°С)
–273,16
0
–272
1
АБСОЛЮТНА ТЕМПЕРАТУРА (°К)
УДАРНА ХВИЛЯ В ГАЗАХ 6000°–34000°
H
0


ТЕМПЕРАТУРИ
10^{11}
10^{10}
10^{9}
10^{7}
10^{6}
10^{5}
10^{4}
10^{3}
10^{2}
10
1
0
-1
-10
-10^{2}
-273
10^{-18} 10^{-9} 10^{-6} 10^{-3} 10^{-2} 10^{-1} 1 10 10^{2} 10^{3} 10^{6} 10^{9} 10^{10} 10^{11} 10^{12}
Т И С К И
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

матимуть дуже помірну температуру. Наприклад, мідні форсунки, по яких в доменну піч подається заздалегідь підігріте повітря, охолоджуються водою. Завдяки цьому вони не розплавляються, навіть перебуваючи в найгарячішій зоні домни. У ракетних двигунах камери згоряння і форсунки, зроблені навіть з простої вуглецевої сталі, можна успішно охолоджувати або рідким пальним, або окислювачем, що циркулює навколо камери.

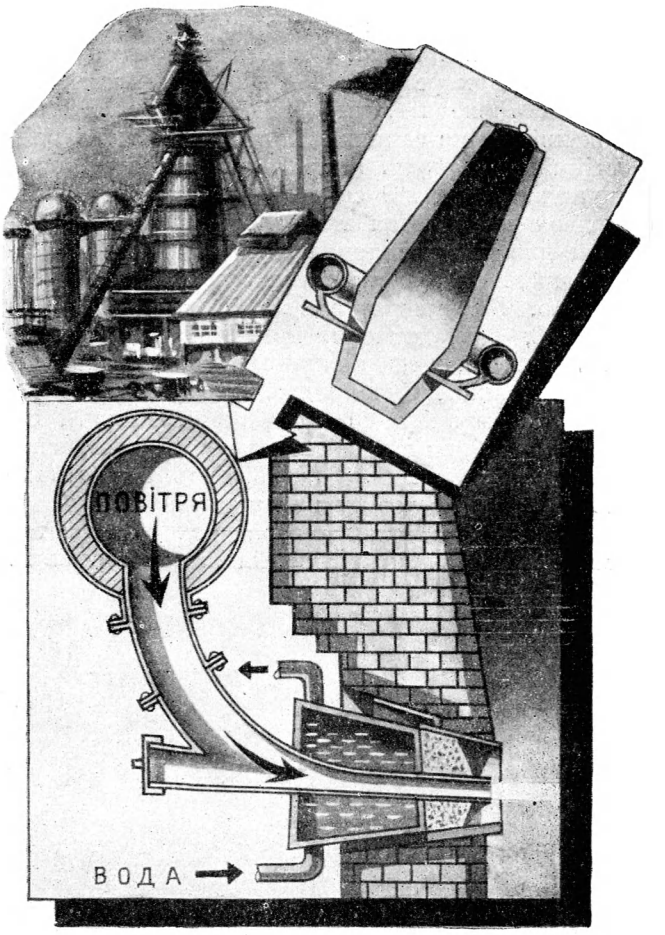
Останнім часом починає знаходити застосування спосіб охолодження «випотіванням». Охолодні рідину або газ під дуже великим тиском нагнітають у «сорочку», яка оточує камеру. Просочуючись крізь її пористі стінки, вони створюють на стичній з полум'ям поверхні тонку плівку, яка, безперервно випаровуючись, охолоджує стінки камери.

Примусове охолодження, безперечно, ускладнює конструювання і виробництво двигунів. Але це поки що найбільш надійний шлях для досягнення в реактивному двигуні потрібних робочих температур, які досягають 2000—3000°С.

Адже можливості різкого збільшення швидкості польоту полягають у застосуванні нових видів палива. У лабораторних умовах тепер удалось добути температуру горіння, вищу від 3000°С. А суміш фтору і водню дозволяє добути ще вищі температури — до 4500°С. Однак фтор — дуже корозіююча і отруйна речовина. Це дуже утруднює його скільки-небудь широке застосування. І все-таки ця суміш найбільш перспективна для космічних польотів.

Для збільшення кількості теплоти приблизно на 20% можна було б застосувати як окислювач рідкий озон або порошки алюмінію і берилію. Але це, в свою чергу, ще більше утруднить розв'язання проблеми охолодження двигунів і викличе потребу створення нових жароміцних матеріалів для них. Горіння в ракеті — це, мабуть, найостанніше досягнення в області використання контрольованої кількості теплоти, створюваної за допомогою хімічних реакцій.

Більш сучасних засобів для збільшення робочих температур слід чекати від застосування не хімічної, а ядерної енергії. Тільки ці роботи знаходяться в найпочатковішій стадії. Справа тут ще й у тому, що речовин, здатних скільки-небудь довго витримувати ці температури, у розпорядженні вчених та інженерів поки що немає. Ось чому так важливо створити жароміцні матеріали, здатні витримувати надвисокі температури.



У доменній печі при температурі близько 2000° форсунки, по яких до неї нагнітається спочатку підігріте повітря, можна робити з... міді, якщо їх підсилено охолоджувати за допомогою потоку води.

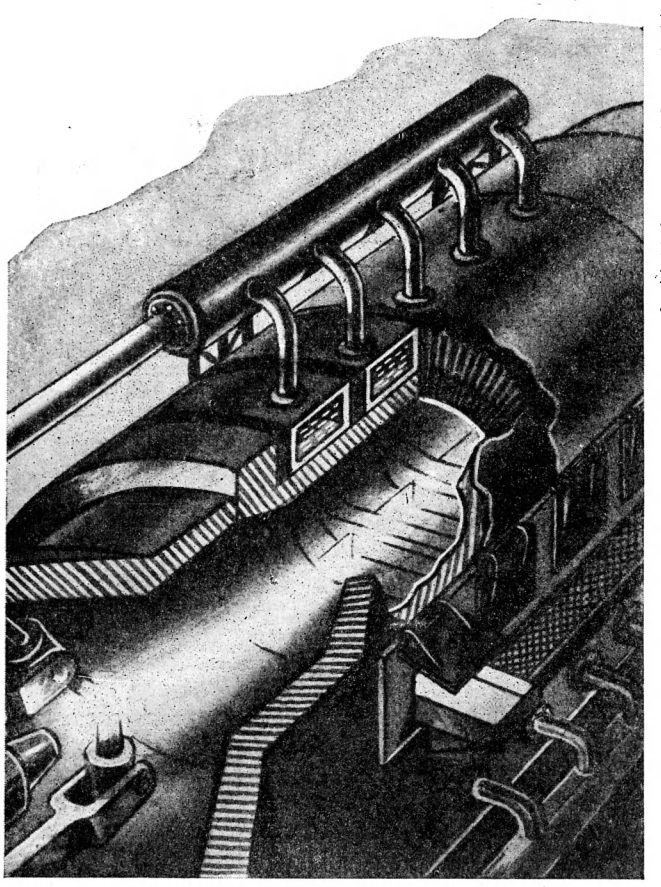
ХІМІЯ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Найцікавіша для хіміка область температур лежить між 2000 і 5000°С. В міру руху вгору по цій шкалі всі звичні уявлення про хімічні реакції виявляються даремними, бо ми потрапляємо в зовсім інший світ. Вище від

Таблиця 20. Залежність тисків (горизонтальна шкала) від температур (вертикальна шкала), які супроводять ті або інші фізичні процеси в природі і техніці.

2000°С рідка вода не може існувати, незважаючи ні на які тиски. Отже, виключаються всі види водних реакцій. Твердий стан може зберігати лише небагато речовин. У розпорядженні хіміка залишаться тільки прості і найстійкіші молекули газів, таких, як азот, окис вуглецю і ін., які складаються не більше ніж з двох або з трьох атомів. Порушується звичний для нижчих температур хід реакцій, наприклад, окис вуглецю не згоряє в атмосфері кисню. В температурі, вищій від 4000 або 5000°С, розпадаються молекули і в зв'язку з цим практично припиняються звичайні хімічні реакції. Справу доводиться мати головним чином з іонами та атомами. Реакції, що при звичайних температурах проходять досить повільно, при 2000°С перебігають так блискавично, що спостерігати їх неможливо.

При звичайних температурах каталізатор може значно прискорити хід хімічної реакції. А при температурі 2000°С швидкість і енергія реакції настільки високі, що каталізатор вже не відіграє ніякої ролі.



Високотемпературна піч, що працює за допомогою довгого факела полум'я вольтової дуги інтенсивного горіння, розвиває температуру до 10000°.

У хімічній промисловості за допомогою високих температур добувають цінні речовини, добути які при звичайних температурах дуже важко. Прикладом цього може бути вилучення азоту з повітря. Досі, щоб його добути, широко застосовували так званий процес Габера, в якому азот повітря, сполучаючись з воднем, дає аміак. Цей процес дуже складний, дорого коштує, потребує каталізатора і нагріву при високому тиску. Тепер є можливість виробляти окис азоту за допомогою нового, простішого способу — за рахунок використання високих температур.

Якщо нагріти азот і кисень повітря до 2100°С, то вони дуже швидко вступають в реакцію і утворюють сполуку, яка містить близько 2% окису азоту. Але якщо такій суміші дати можливість повільно охолонути до кімнатної температури, то весь утворений в ній окис азоту знову поділиться на азот і кисень.

Але цю сполуку можна «заморозити», охолодивши її дуже швидко з 2100 до 1500°С. Тоді окис азоту уже не буде розпадатися на азот і кисень і при кімнатній температурі. Процес фіксації азоту методом швидкого охолодження здійснюється в спеціальних двокамерних печах, де струмінь повітря поперемінно швидко нагрівається і так само швидко охолоджується в шарі маленьких кульок магнезиту.

Хімія дуже високих температур сповнена цікавих можливостей у майбутньому. Наприклад, великі перспективи тут відкриваються для добування озону.

Хімія високих температур не має справи з складними органічними сполуками, бо вище 2000°С вони існувати вже не можуть. Проте цілком можливі деякі реакції за участю хлору і фтору. Головна трудність тут у тому, що немає поки що посудини, яка сама не вступила б у реакцію з цими дуже активними речовинами.

Найвищу температуру на Землі досі можна було спостерігати лише в полум'ї електричної дуги інтенсивного горіння в газовому середовищі, яке перебуває під тиском близько 1000 *атм*. У її всепожираючому полум'ї випаровується все, навіть найбільш тугоплавкі матеріали. У найближчому майбутньому вона, очевидно, застосовуватиметься в хімії і металургії дуже високих температур.

Чим відрізняється інтенсивна дуга від звичайної? У звичайній дузі електричний струм

у позитивному електроді проходить тільки через область світного кратера. Цей кратер займає лише частину площі кінчика вуглини. Таким чином, діаметр кратера залежить від величини струму, що протікає через нього: збільшується при зростанні струму і скорочується при його зменшенні. Збільшення струму в цьому разі не створює збільшення інтенсивності (температури і яскравості) дуги, струм просто розподіляється на більшу площу електрода.

Та ось кратер захоплює всю поверхню позитивного електрода, і становище різко змінюється. Тепер збільшення струму, який проходить через один і той самий переріз електрода, викликає збільшення інтенсивності горіння дуги, тобто підвищує її температуру і підсилює яскравість свічення. Якщо при цьому почати збільшувати струм, що проходить через дугу, вугілля починає плавитись.

У такий момент і настає дуже важливе явище. Температура дуги несподівано підскакує до величини, яка дуже перевищує точку кипіння вуглецю, і з позитивного електрода вихоплюється сліпуче яскравий і дуже довгий язик білого полум'я. Він виносить з собою надлишок енергії, яку розвиває електричний струм дуги.

У цьому незвичайному стані дугу можна використати як своєрідну високотемпературну піч. Роздрібнену в дуже тонкий порошок речовину, яку необхідно піддати високотемпературній хімічній обробці, домішують до порошку, з якого роблять позитивний електрод. Випаровуючись, ця речовина потрапляє в довге полум'я дуги, де вступає в реакцію з будь-якою іншою речовиною, що вводиться в цю зону.

Рухаючись з великою швидкістю, газоподібна речовина миттю виноситься із зони високої температури і потрапляє в навколишню атмосферу. Тут вона швидко охолоджується і конденсується, тобто по суті відбувається те саме різке охолодження газів, яке відіграє таку важливу роль у хімії високих температур і при якому речовини, що вступили в хімічну реакцію, знов не розпадаються.

Описаний процес був використаний для добування берилію з руди. Факел полум'я з позитивного електрода, в якому міститься випарувань вуглець з домішаною до нього берилієвою рудою, проходить через атмосферу газоподібного хлору, який, сполучаючись з випаруваним металом, утворює хлорид берилію. Крім берилію, в руді звичайно містяться алюміній, залізо та інші метали. Сполучаючись з хлором, вони так само утворюють ряд металевих хлоридів, кожен з яких має свою, відмінну від інших температуру конденсації. Тому довгий факел полум'я дуги пропускають по каналу, який складається з кількох окремих камер. У кожній з них в міру зниження температури полум'я і відбувається конденсація пари солей відповідних металів. З цих солей, що осіли на дні камери, потім за допомогою електролізу добувають чистий метал.

ДУЖЕ ВИСОКІ ТЕМПЕРАТУРИ

До цієї області можна умовно віднести температури, що лежать у межах приблизно від 10 000 до 25 000°С. Нема жодної речовини на Землі, природної чи штучної, яка протягом тривалого часу могла б витримати нагрів понад 10 000°С.

Проте добути такі температури, правда, на дуже короткий час, все-таки можливо. Конденсатор великої місткості заряджають до напруги в кілька сотень тисяч вольтів і замикають його тонким провідником із найтугоплавкішого матеріалу. Внаслідок виникає електричний розряд величезної сили. Він з вибухом розплавляє провідник, створюючи на дуже короткий проміжок часу температуру 10 000—20 000°С.

Поки що подібні температури, крім астрономів, можуть, мабуть, цікавити лише інженерів-астронавтів. Проте ця область заховує в собі дуже важливі фізичні процеси, які вже в найближчому майбутньому можуть становити безсумнівний інтерес і для фізиків.

Останніми роками вчені дістали в свої руки новий пристрій для дослідження дуже високих температур. Йдеться про камеру, в якій за допомогою вибуху можна створити ударні (вибухові) хвилі в газі, що розвивають за короткий час величезні тиски, а отже, і температури. Дія камери грунтується на відомому факті, що при швидкому стисканні газ нагрівається. Якщо ж цей тиск наростає з величезною швидкістю, як це буває в ударній хвилі, то в теплоту перетворюється значна частина енергії руху газу (або тіла, що рухається в газі). Наприклад, при швидкості, яка перевищує в чотири рази швидкість звуку, носова частина реактивного літака, якщо її не охолоджувати, нагрілася б майже до 1000°С. При швидкості, яка перевищує швидкість звуку в 10 раз, ударна хвиля може нагріти стискувану частину газу більше, ніж до 3000°С.

Камера ударних хвиль являє собою трубу, закриту з обох кінців і розділену на дві частини тонкою мідною перетинкою. В одній її частині вибухає суміш водню з киснем. У результаті в ній створюється високий тиск, який зростає доти, поки він не прорве перетинку. Тоді в газі, що міститься в другій половині трубки, виникає і поширюється ударна хвиля, швидкість якої може в 20 раз перевищувати швидкість поширення звуку. У другому типі камери газ нагрівають потужним електричним розрядом. Це дозволяє дістати ударну хвилю, швидкість якої вже в 34 рази перевищує швидкість звуку.

Такі прилади дають можливість вивчати поведінку газів, які мають високу енергію руху, і, зокрема, їх електричні й магнітні властивості. Наявність у такому газі великої кількості вільних електронів робить його дуже добрим провідником струму незалежно від його хімічної природи.

Завдяки високій провідності довга нитка нагрітого до дуже високої температури газу поводить себе як провід, уміщений в електричному або магнітному полі. Подібне явище спостерігається під час викидання величезних мас розжарених газів з поверхні Сонця, коли язики протуберанців у своєму русі викривляються під дією магнітного поля Сонця.

Зіткнення в космічному просторі двох гігантських газових хмар, або галактик, також може привести до утворення в газовому середовищі ударних хвиль надзвичайної потужності. Адже температури і тиски, що розвиваються при таких зіткненнях, величезні. Так, голландський астроном Оорт пояснює світіння деяких туманностей саме зіткненням величезних мас міжзоряного газу. Радянський астроном С. В. Пікельнер недавно застосував теорію утворення ударних хвиль для пояснення особливої будови тонковолокнистих туманностей. Їх виявили в тих місцях Всесвіту, де викинуті з наднової зірки, що вибухла, потоки газу стикаються з хмарами газу, які знаходяться у міжзоряному просторі.

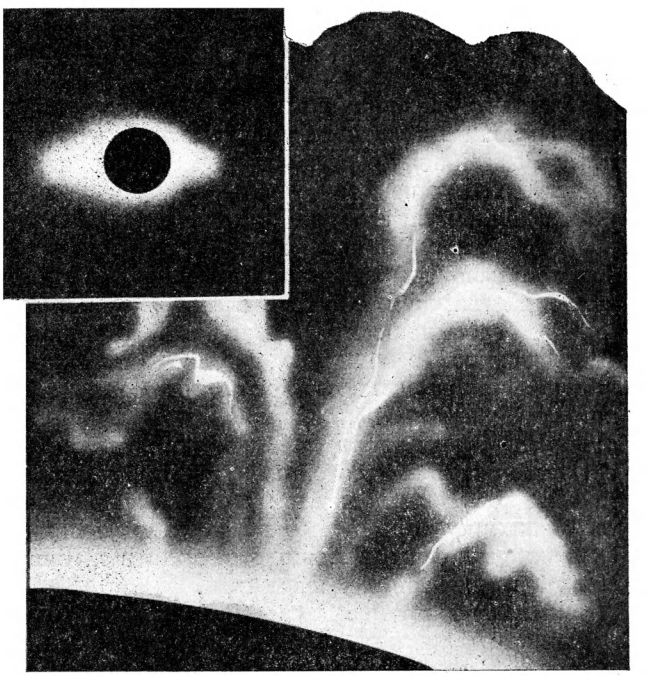
Нарешті недавно було виявлено потужне радіовипромінювання в сузір'ї Лебедя. Причина його полягає у величезній ударній хвилі, що проходить через газове середовище двох галактик, які зіткнулися. Це припущення підтверджується і знімками світного аргону у вибуховій камері при проходженні в ньому ударної хвилі. Найяскравіша ділянка світіння газу збігається з вузькою смужкою фронту ударної хвилі.

НАДВИСОКІ ТЕМПЕРАТУРИ

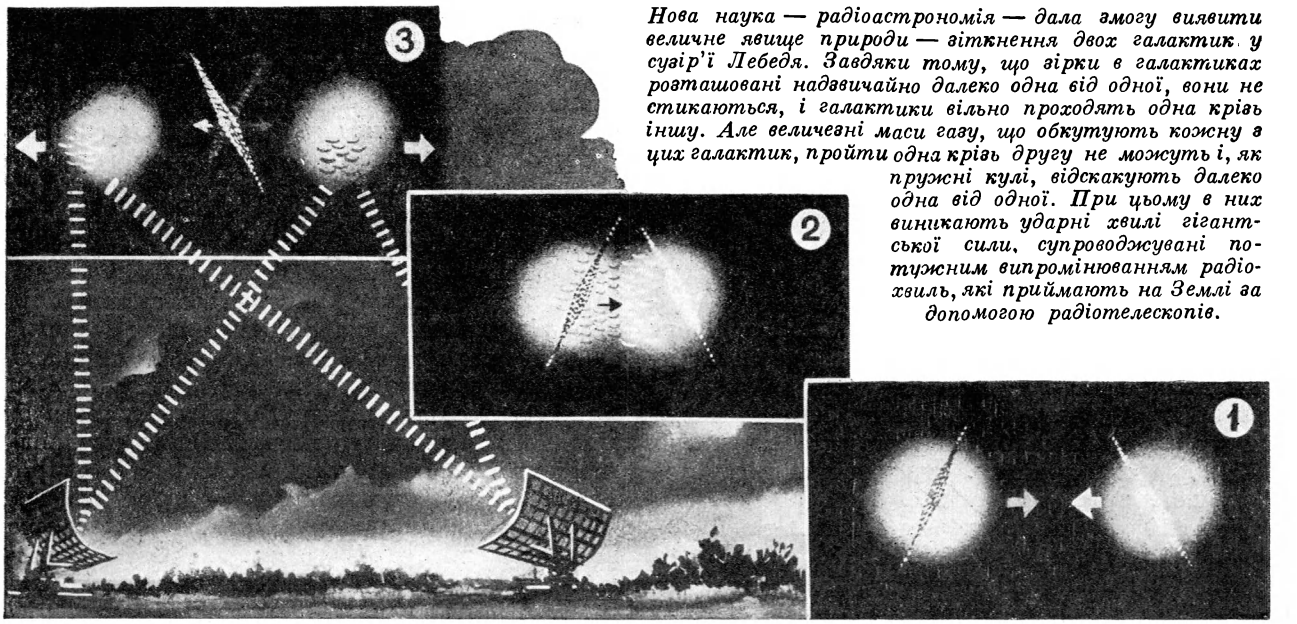
Розглянемо деяку замкнену систему (об'єм) газу, яка не дістає енергії з навколишнього простору і не віддає йому своєї.

Власна енергія такої системи, що залежить, природно, від температури, розподіляється в ній рівномірно завдяки безладному руху й безперервним зіткненням між собою частинок газу. В результаті встановиться певний середній енергетичний стан середовища. Такому станові буде відповідати й деякий середній розподіл швидкостей руху частинок газу, хоч окремі частинки його можуть рухатися з швидкістю або набагато меншою, або більшою від цієї середньої швидкості всієї сукупності частинок даного об'єму газу.

При зіткненні частинок газу між собою, залежно від швидкості їх руху, виникають електромагнітні випромінювання найрізноманітніших частот, а також взаємне поглинання цих випромінювань, яке також може мати деякий середній розподіл частот.



У величезних струменях розжарених газів, що викидаються поверхнею Сонця, виникають ударні хвилі надзвичайної потужності, які іонізують атоми речовини. Завдяки цьому в струменях газу, що перетворилися в гігантські провідники, виникають електричні струми величезної сили. Під дією магнітного поля Сонця ці струмені газу — протуберанці — різко викривляються.



Нова наука — радіоастрономія — дала змогу виявити величне явище природи — зіткнення двох галактик у сузір'ї Лебедя. Завдяки тому, що зірки в галактиках розташовані надзвичайно далеко одна від одної, вони не стикаються, і галактики вільно проходять одна крізь іншу. Але величезні маси газу, що обкутують кожну з цих галактик, пройти одна крізь другу не можуть і, як пружні кулі, відскакують далеко одна від одної. При цьому в них виникають ударні хвилі гігантської сили, супроводжувані потужним випромінюванням радіохвиль, які приймають на Землі за допомогою радіотелескопів.

Коли ми розглядаємо фізичний стан газоподібної речовини всередині зірок, то вважаємо, що її температура висока. При цьому ми маємо на увазі, що й середня швидкість руху частинок цієї речовини і середня інтенсивність випромінювань, викликаних зіткненням між собою, дуже високі. Але бувають випадки, коли система, відповідаючи умовам середнього розподілу швидкості частинок, не задовольняє умов середнього розподілу випромінювань. У такому випадку висока температура не означає, що вона одночасно має і дуже інтенсивне випромінювання. Цим, зокрема, пояснюється, чому видима поверхня Сонця (фотосфера), яка має температуру «лише» близько 6000°С, створює значно потужніше світлове та теплове випромінювання, ніж сонячна корона, температура якої відповідає приблизно 1 000 000°С.

Частинки речовини корони рухаються з значно більшими швидкостями, ніж частинки фотосфери. Це й створює її високу температуру. Рух же частинок у фотосфері відбувається із значно меншими швидкостями, що пояснює її нижчу температуру. Проте частинки речовини в короні так далекі одна від одної, що зіткнення між ними, які викликають випромінювання, відбуваються значно рідше, ніж у фотосфері. Внаслідок цього енергія випромінювання фотосфери значно перевищує енергію випромінювання корони.

Цікаве й інше питання: чому температура всередині Сонця досягає 10 млн. градусів або навіть вище, тоді як температура в надрах Землі, очевидно, не перевищує кількох тисяч градусів?

У центрі Землі речовина перебуває під тиском більше ніж 1,5 млн. *кГ/см²*. Такого тиску все-таки не досить, щоб викликати розпад твердих і рідких речовин. У центрі Сонця тиск досягає 500 млрд. *кГ/см²* і більше. Такий високий тиск неспроможна витримати жодна звичайна речовина. І якби Сонце складалося з тих самих речовин, з яких побудована Земля, то при такому тиску мало б статися загальне осідання структури атомів, а отже, і швидке, помітне стискання Сонця.

Але таке стискання має свої межі. Під його дією внутрішні частини Сонця нагріваються дедалі більше, підвищуючи свій внутрішній, зворотний тиск. Настає своєрідний стан рівноваги, коли внутрішній тиск газу зрівноважує тиск усіх шарів речовини, що лежать вище. Дальше скорочення об'єму на цьому повинно припинитись.

У свою чергу підвищення температури центральних частин Сонця викликає практично повну іонізацію його речовини. Це спричиняється до появи внутрішніх джерел енергії і теплоти — термоядерних реакцій возз'єднання найлегших елементів у важчі.

Такими є міркування, які й привели астрономів до висновку про те, що температура й тиск всередині зірок повинні бути дуже

високими і що в кожній зірці встановився стан певної рівноваги, яка автоматично підтримується на певному рівні.

Дуже висока температура, яка існує всередині зірок, викликає переміщення теплоти до їх поверхні, природно, холоднішої. Це, зокрема, пояснює, чому зірки світяться безперервно. Вони випромінюють енергію в простір з такою ж самою швидкістю, з якою дістають її зсередини. Міра цього внутрішнього обміну енергією визначає світність зірки.

Таким чином, зірка випромінювала б енергію, навіть коли б всередині неї і не відбувалися такі потужні процеси, як термоядерні реакції. Підставою для цього несподіваного висновку є описаний вище процес стискання під дією сил тяжіння. Стискаючись і розігріваючись, зірка випромінюватиме з своєї поверхні і деяку кількість енергії. Але таке джерело енергії недовговічне. Якби Сонце світило тільки за рахунок стискання, то воно давно б згасло, проіснувавши не більше 20—30 млн. років.

Тепер відомо, що всередині Сонця та інших зірок відбуваються ядерні реакції, в результаті яких вивільняються величезні кількості енергії. Наприклад, об'єднання чотирьох протонів в одно ядро гелію супроводиться виділенням величезної кількості енергії. Це дає можливість зірці на надзвичайно довгий проміжок часу зберігати свої розміри.

Якби в даних умовах об'єм Сонця за рахунок стискання дещо зменшився, то викликане цим збільшення його внутрішнього тиску й температури прискорило б хід термоядерних реакцій. А отже, збільшилася б і кількість енергії, що виділяється при цьому. Оскільки поверхня Сонця була б неспроможна випромінювати такий великий надлишок енергії, це викликало б підвищення внутрішнього тиску. А він в свою чергу збільшив би Сонце до його теперішніх розмірів.

І, навпаки, якби Сонце стало трохи більшим від його теперішніх розмірів, то із зменшенням внутрішньої температури кількість енергії, яка створюється всередині нього за рахунок термоядерних реакцій, зменшилася б. Ця втрата енергії викликала б спад внутрішнього тиску і, як наслідок, зменшення розмірів Сонця до його теперішнього стану.

Такий короткий підсумок нашої, далеко ще не повної, подорожі в світ температур і тисків. Ступенями розрідження і ущільнення матерії, повільним переміщенням частинок, яке майже не виявляється, або шаленим вихором їх руху не обмежується нескінченна різноманітність форм існування і руху матерії. Адже вона одночасно перебуває і в стадії руйнування, і в стадії створення найрізноманітніших своїх елементів. Чим більше людина вивчає цей захоплюючий величний і безмежний світ, тим глибше вона пізнає закони, що керують ним, і ширше використовує їх для своїх потреб.

ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТЕПЛОВИХ МАШИН

Машина, яка працює, приводить у рух верстати і поїзди, судна і автомобілі, називається двигуном. Тепловий двигун — це машина, що працює за рахунок теплоти, машина, в якій відбувається перетворення теплоти в роботу.

Теплові двигуни широко відомі. Це — суднові, автомобільні, авіаційні, мотоциклетні та багато інших (докладніше про них див. в т. 5 ДЕ). На перший погляд робота теплових двигунів може здатися нескладною. Паливо горить, тиск газів зростає, газ штовхає поршень — і ось уже швидко мчить ваш мотоцикл. Але створювати й застосовувати теплові двигуни так успішно було б неможливо, якби вчені не досліджували докладно, як же саме, за якими законами природи і з яким ефектом відбувається в теплових двигунах дуже складний процес перетворення теплоти в роботу.

На перший погляд може здатися, що між теплотою, яка викликає зміну температури, і роботою, що виявляється, скажімо, у вигляді обертання вала двигуна, немає нічого спільного. Насправді це не так. Для теплоти і роботи спільним є рух, з тією різницею, що механічна робота — рух великих і складних тіл, таких, наприклад, як мотоцикл, а теплота — це рух молекул, з яких складаються всі тіла.

Ще в 1748 р. великий російський учений Михайло Васильович Ломоносов твердив, що «причина теплоти полягає у внутрішньому обертальному русі зв'язаної матерії». Він ді-

йшов висновку про те, що чим дужче нагріте тіло, чим більше підведено до нього теплоти, тим швидше відбувається внутрішній рух його частинок — молекул.

Отже, в двигуні вашого мотоцикла безладний, невизначений рух молекул газу, який відбувається з величезними швидкостями, перетворюється на впорядкований, визначений, рівномірний обертальний рух, що передається ланцюгом ведучому колесу. Чи не можна подивитись, як в циліндрі мотоцикла наводиться порядок і безладний рух молекул перетворюється в точно визначений рух поршня? Безпосередньо на роботі мотоциклетного двигуна цього побачити не можна.

Спочатку потрібно обізнатися з роботою найпростішої теплової машини, настільки простої, що вона навіть незручна для практичного застосування. Зате в такій найпростішій тепловій машині, яку неважко зробити самому, ми зможемо дуже виразно побачити на досліді, як з невидимого хаотичного руху мільярдів молекул виникає ясно видимий упорядкований рух.

Розширення тіл при нагріванні викликається збільшенням швидкості й розмаху коливань частинок, з яких складається тіло; воно тим більше, чим сильніший нагрів. Тому для нашого найпростішого двигуна треба взяти фізичне тіло, здатне витримувати високу температуру. Візьмімо як таке тіло круглий металевий стержень і спорудимо з нього найпростіший тепловий двигун (рис. 1).

Цей двигун складається з металевого стержня *1*, що упирається зліва у міцний стояк *2*, а справа — у нижній кінець важеля *3*, з'єднаного з стояком нашої машини шарніром *4* і зв'язаного у верхній своїй частині з підвішеним до нього важким тягарем *5*. Під стержнем розташований газовий пальник *6*, з'єднаний з газопроводом краном *7*.

Запам'ятаємо положення тягаря по стрілці-покажчику *8*, потім відкриємо кран *7* і запалимо газ. Наш двигун почне працювати. У міру нагрівання стержня від буде видовжуватись і відхиляти важіль *3*, підіймаючи тягар. Це легко помітити по відстані, що збільшилась від стрілки-покажчика. Знаючи вагу тягаря (наприклад, 5 *кГ*) і величину підйому (наприклад, 5 *мм*), ми легко визначимо, яку виконано роботу. Це буде добуток сили на пройдений шлях:

$$5\ кГ \times 5\ мм = 25\ кГ \cdot мм.$$

За рахунок чого одержано цю роботу? Звичайно, за рахунок теплоти. Якась кількість газу згоріла (точний газовий лічильник завжди може визначити цю кількість), при цьому виділилась якась кількість теплоти (її можна підрахувати, знаючи теплотворну здатність палива). А ця теплота в нашій нехитрій машині перетворена в роботу шляхом використання теплового розширення тіл.

Чи вся теплота, яка виділилась при згорянні газу, перетворена тут у роботу? Без відповіді на це запитання ми не зможемо відповісти й на питання про те, чи вся теплота, що виділяється при згорянні бензину в циліндрі нашого мотоцикла, перетворюється в роботу. Постараємось докладніше розібратись у результатах нашого нескладного досліду і зробити з нього певні висновки.

Висновок перший. Насамперед з нашого досліду видно, що для перетворення теплоти в роботу потрібно мати будь-яке фізичне тіло, в якому можна здійснити теплове розширення за рахунок нагрівання. Це фізичне тіло застосовують, щоб здійснити перетворення теплоти в механічну роботу. Називають його робочим тілом. У нашому найпростішому тепловому двигуні таким робочим тілом є металевий стержень, у мотоциклі — гази, одержувані при згорянні бензину, а в паровій турбіні — водяна пара.

Висновок другий. Під час нашого досліду з металевим стержнем відбулися помітні зміни. З холодного він став гарячим; таким чином, на початку нашого досліду стержень знаходився в одному тепловому стані (температура та об'єм на початку досліду), а в кінці досліду — в іншому (температура та

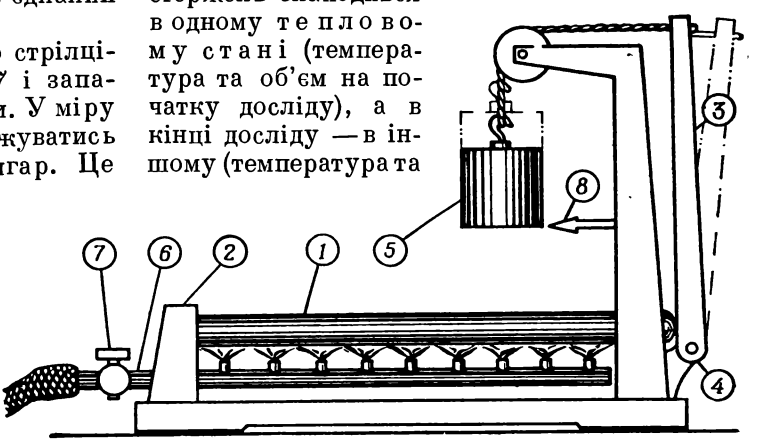


Рис. 1. Найпростіший тепловий двигун з твердим робочим тілом.

об'єм у кінці досліду). Значить, зміни, що сталися в робочому тілі, — це перехід із одного теплового стану в інший. Такий перехід носить назву процесу. Процеси, очевидно, відбуваються і в циліндрі мотоцикла, де при кожному спалаху бензину змінюється й температура, і тиск газу, і його об'єм.

Про тепловий стан тіла можна судити з так званих параметрів теплового стану. Про деякі з них ми вже згадували — це температура об'єм. Для дослідження теплового стану зручніше користуватися так званим питомим об'ємом, тобто об'ємом, який займає одиниця маси робочого тіла, наприклад один кілограм. Дуже важливий параметр — тиск. Є і інші параметри, але ми спочатку постараємося розібратися у фізичній суті роботи теплових двигунів тільки за допомогою трьох параметрів: температури, тиску та питомого об'єму. У науці їх прийнято позначати буквами: температуру — T, тиск — p і питомий об'єм — v.

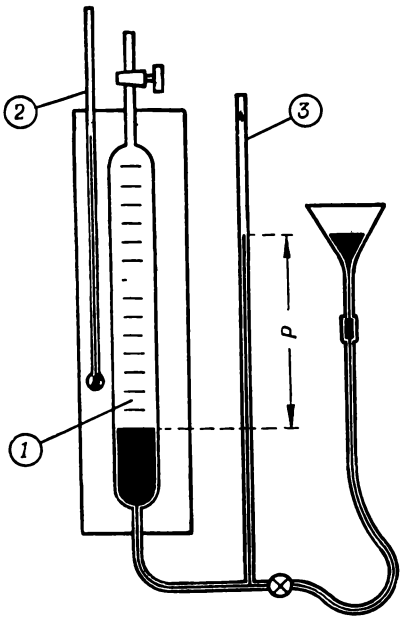


Рис. 2. Прилад для визначення стану робочого тіла.

Усі параметри теплового стану тіла тісно пов'язані між собою, і одночасно їм усім не можна надавати довільних значень. Цей зв'язок існує тому, що величина кожного з параметрів визначається одним і тим самим рухом молекул. Зменшіть об'єм — відстані між молекулами стануть меншими, вони будуть частіше стикатися, що приведе до підвищення температури, при цьому вони будуть частіше та сильніше битися об стінки, що в свою чергу приведе до підвищення тиску.

Фізичний зв'язок параметрів між собою має математичне вираження. Це дає можливість точно розраховувати і проектувати теплові двигуни. Уявімо для спрощення, що як робоче тіло теплового двигуна взято ідеальний газ[1]. Молекули газу стикаються, при цьому відбувається абсолютно пружний удар. У проміжках між ударами одна об одну молекули рухаються прямолінійно. Тоді можна знайти дуже просте рівняння стану — формулу, яка показує характер зв'язку між параметрами такого газу. Ця формула має такий вигляд:

$$p \cdot v = R \cdot T,$$

де p, v і T — відомі нам параметри: тиск, питомий об'єм і температура, а R — так звана газова стала — величина, що характеризує працездатність того або іншого газу.

З цієї формули видно, що коли температуру робочого тіла підтримувати сталою, то збільшення тиску в кілька разів супроводиться зменшенням об'єму в стільки ж разів. При зменшенні тиску об'єм відповідно зросте у стільки ж разів. При сталому об'ємі збільшення температури викличе таке саме збільшення тиску, а при сталому тиску зміна температури викличе відповідні зміни об'єму.

Таким чином, рівняння стану дає можливість по двох параметрах (звичайно таких, які легше виміряти: за температурою та тиском) визначити третій. Але наведене рівняння справедливе лише для уявлюваного, ідеального газу. Для існуючих в дійсності і особливо для стиснутих газів рівняння виходять надзвичайно складними, і тому часто стан робочих тіл визначають дослідним шляхом.

Такий дослід ви можете провести самі за допомогою показаного на рис. 2 приладу, де досліджується робоче тіло — газ, вміщений у пробірці *1* з поділками, які дають можливість вимірювати величину його питомого об'єму. Термометр *2* вимірює температуру, а тиск вимірюється величиною стовпа рідини (води або ртуті) в манометрі *3*.

Для дослідження робочих тіл теплових двигунів, що працюють при великих тисках і температурах, потрібні складніші прилади. Це дослідні або експериментальні установки, призначені для дослідження залежності між температурою і тиском при сталому об'ємі робочого тіла.

Досліджуваний газ або пару в одній із таких установок вміщено в міцний стальний

[1] Ідеальний газ — це така уявлювана газоподібна речовина, молекули якої дуже малі порівняно з відстанями між ними, а сили взаємодії між молекулами відсутні. Поняття ідеального газу дуже зручне для теоретичних розрахунків. До ідеального газу наближаються за вказаними властивостями розріджені гази.

балон, який нагрівається електричною спіраллю. Для вирівнювання температури застосовано мідний циліндр, а для зменшення втрат теплоти — подвійну ізоляцію.

Зовнішній ізолятор являє собою посудину з водою, зміна температури якої дає змогу реєструвати витікання теплоти. Кількість виділеної спіраллю теплоти точно вимірюється витратою електроенергії за допомогою амперметра й вольтметра.

Для вимірювання температури всередині балона застосовують термопари. Вимірюючи гальванометром струм від термопари всередині балона, можна визначити різницю між температурою досліджуваного робочого тіла і температурою танучого льоду, в який вміщено другий спай термопари.

Ця установка дуже складна і включає в себе багато найточніших вимірювальних приладів. Дослідження на ній потребує спеціальної наукової підготовки.

Тепер, коли ми ознайомилися з тепловим станом тіл і процесами переходу від одного теплового стану до іншого, повернемось до нашого найпростішого теплового двигуна.

Висновок третій. У проведеному нами досліді відбулося два помітних явища. Перше — стержень нагрівся, тобто змінив свій тепловий стан. Друге — тягар піднявся, отже, здійснено механічну роботу. Очевидно, обидва явища мають одну спільну причину — підведення теплоти, адже до цього не було ні нагрівання, ні підіймання тягаря. Отже, підведену теплоту затрачено, по-перше, на нагрівання стержня і, по-друге, на підіймання тягаря. Але це в свою чергу свідчить про те, що *не всю підведену до стержня теплоту перетворено в механічну роботу.*

Такий результат нашого досліду справедливий для будь-якого теплового двигуна. Адже без теплового розширення не можна мати роботи. А для цього необхідно нагріти тіло. Значить, за законами природи в тепловому двигуні неможливо всю використану теплоту перетворити в механічну роботу. Це добре видно і на прикладі мотоцикла. Його спрацьовані гази дуже гарячі і виносять з собою багато теплоти, не перетвореної двигуном у механічну роботу. У цьому легко переконатись, встановивши термометр або термопару в усті вихлопного конуса мотоцикла, який працює на дослідному верстаті.

Пригадаємо, що при нагріванні тіла тепловий рух молекул підсилюється, при цьому зростає їх кінетична енергія, а отже, і внутрішня енергія тіла. Судити про це можна з підвищення температури тіла.

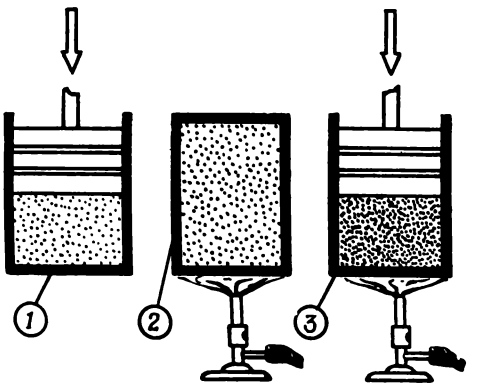


Рис. 3. Три способи зміни внутрішньої енергії тіла.

Тоді ми можемо сказати, що затрачена на нагрівання нашого стержня теплота пішла, по-перше, на виконання зовнішньої роботи (підіймання тягаря) і, по-друге, на збільшення внутрішньої енергії стержня, що є ще одним важливим параметром теплового стану тіла.

Внутрішня енергія тіла зв'язана з його температурою. Відповідно до змін температури можна простежити за змінами внутрішньої енергії тіла. Зміни внутрішньої енергії можна досягнути не тільки підведенням або відведенням теплоти (нагріванням або охолодженням). На рис. 3 показано три способи зміни внутрішньої енергії тіла, які ви можете випробувати самі: 1) зміною об'єму тіла, наприклад стисканням *(1)*; робота при цьому йде на збільшення потенціальної енергії молекул, а отже, і внутрішньої енергії тіла; 2) підведенням або відведенням теплоти: теплота *(2)*, що підводиться при нагріванні тіла, спричиняється до збільшення кінетичної енергії теплового руху, а отже, і внутрішньої енергії тіла і, нарешті, 3) одночасною зміною об'єму і підведенням або відведенням теплоти, наприклад, одночасне стискання і нагрівання *(3)*. Можна так комбінувати підведення теплоти (нагрівання) із збільшенням об'єму (розширенням), що при цьому внутрішня енергія залишатиметься сталою. У цьому єдиному випадку вся теплота, підведена до робочого тіла, піде цілком на зовнішню роботу розширення. Подумавши, ви переконаєтесь, що це не суперечить зробленому вище висновку про те, що в тепловому двигуні перетворити в роботу всю теплоту неможливо. Далі ми ще повернемось до цього питання.

З нашого досліду з найпростішим двигуном у формі стержня ми дістали дуже важливий висновок, який полягає в тому, що *підведена до тіла теплота дорівнює зміні внутрішньої енергії тіла й здійсненій тілом зовнішній роботі.*

Ця формула виражає собою перший закон термодинаміки — науки, що вивчає взаємоперетворення теплоти та роботи,— і являє собою окремий випадок виявлення загального закону природи: закону збереження й перетворення енергії.

З першого закону термодинаміки маємо висновок: неможливо збудувати такий тепловий двигун, який здійснював би механічну роботу без відповідної витрати теплоти. Такий двигун учені назвали «перпетуум-мобіле першого роду», тобто «вічний двигун першого роду». Але виявляється, що й витрати теплоти ще не досить, щоб дістати тепловий двигун, а тому існує поняття про «перпетуум-мобіле другого роду», з яким ми обізнаємося пізніше.

Висновок четвертий. Повернемося до нашого теплового двигуна. Постараємося дістати від нього щонайбільше роботи. Для цього треба примусити його працювати якомога довше. Але як це зробити? Нагрівати наш стержень дедалі більше й більше? Але кінець кінцем він нагріється до температури полум'я пальника і далі нагріватися не зможе. Застосувати джерело з вищою температурою, наприклад електричну дугу? Але тоді стержень розплавиться, і наш двигун буде безнадійно зіпсований.

Можна знайти в даному разі тільки один вихід: не продовжувати нашого досліду, а повторювати його багато-багато разів, витрачаючи кожного разу певну кількість теплоти та дістаючи відповідну кількість роботи. При достатньому запасі пального наш дослід можна повторювати роками, перетворюючи в механічну роботу теплоту горіння тисяч кубометрів газу.

Але для того щоб повторити дослід, треба спочатку привести наш тепловий двигун до початкового стану, тобто до початкового стану робочого тіла — металевого стержня. Якщо перший шлях був шляхом нагрівання, то зворотний шлях повинен бути шляхом охолодження. Якщо в нашому досліді ми стержень із холодного зробили гарячим, підводячи до нього теплоту, то для того щоб зробити його знов холодним, потрібно відвести від нього теплоту. Тоді ми примусимо наш тепловий двигун працювати скільки завгодно, здійснюючи необхідну механічну роботу, яка у нашого двигуна трохи ускладнюється. Вона буде тепер складатися з двох процесів, які чергуються. Перший процес: підведення теплоти, збільшення внутрішньої енергії робочого тіла, збільшення температури і питомого об'єму — підіймання вантажу. Другий процес: відведення теплоти, зменшення внутрішньої енергії робочого тіла, зниження його температури, зменшення питомого об'єму — опускання вантажу.

Необхідність періодичного повторення описаних процесів показує, що тепловий двигун — періодично діючий двигун. Про періодичність дії теплових двигунів переконливо свідчить своїм голосним тріском ваш мотоцикл, бо кожен новий звук вихлопу знаменує завершення окремого періоду роботи двигуна.

Висновок п'ятий. З перелічених вище змін, які відбуваються в періодично діючому тепловому двигуні, звернемо свою увагу на дві: на підведення і на відведення теплоти. Як виконати ці процеси? Перший ми виконали, спалюючи газ. Теплота спалюваного газу сама собою стала переходити до стержня тому, що така природна властивість теплоти. Теплота сама собою переходить від тіл з вищою температурою до тіл з нижчою температурою, але ніколи — в зворотному напрямі. Тут спостерігається велика подібність до руху води — завжди тільки з верхнього рівня на нижній.

Описаний закон природи показує, що для здійснення процесу охолодження стержня треба знайти тіло або середовище з нижчою, ніж у стержня, температурою. У цьому випадку теплота сама собою переходитиме від стержня до цього тіла чи середовища. У нашому досліді ми можемо використати те саме середовище, яке успішно використовує і багато реальних теплових двигунів,— холодну воду. Є теплові двигуни, які називаються двигунами з повітряним охолодженням. До таких двигунів належить і двигун нашого мотоцикла, циліндр якого має багато тонких металевих реберець, зроблених для того, щоб повітря краще охолоджувало головку циліндра. Повітрю ж віддається і головна частина невикористаної теплоти — вона виноситься із спрацьованими газами. Залишаючи вихлопну трубу мотоцикла, гарячі гази надходять у величезний холодильник — атмосферу.

Отже, щоб дістати роботу від періодично діючого теплового двигуна, ще не досить мати велику кількість теплоти, так само, як не може

працювати водяне колесо, збудоване на березі озера. Чому? Тому, що воді нікуди рухатися — опускатися з вищого рівня до нижчого, бо рівень озеро має тільки один. Води багато, а користі мало! Так само і з теплотою. Треба знайти шлях для руху теплоти з вищого рівня, визначуваного високою температурою, до нижчого, визначуваного нижчою температурою.

Це означає, що, коли для водяного двигуна потрібні два рівні, два горизонти, для теплового двигуна так само потрібні два рівні, дві температури. У нашому досліді для того щоб періодично діючий тепловий двигун виконав роботу, ми користувались двома джерелами з різним температурним рівнем: полум'ям газового пальника і холодною водою.

Про необхідність двох джерел теплоти для роботи теплового двигуна говорить д р у г и й з а к о н т е р м о д и н а м і к и, з якого випливає, що неможливо побудувати «перпетуум-мобіле другого роду», тобто такий періодично діючий тепловий двигун, який виконував би роботу при наявності одного тільки джерела теплоти, одного тільки температурного рівня. На жаль, не всі знають висновки другого закону термодинаміки і іноді безуспішно пробують винайти вічний двигун другого роду.

Зроблені нами п'ять висновків показують, що для дії теплового двигуна потрібні робоче тіло і два джерела теплоти з різними температурними рівнями, які дають можливість збудувати періодично діючий тепловий двигун. Проте ми ще не знаємо, що треба для того, щоб наш двигун працював економічно, витрачав мало палива.

Теплові двигуни винайдені у XVIII ст. Це були парові двигуни, які витрачали близько 75 *кГ* вугілля для одержання потужності в одну кінську силу. Сучасні парові двигуни споживають тільки 400 *Г*, тобто майже в 200 раз менше.

Для того щоб зрозуміти, як удалось цього добитися, ми повинні докладніше розглянути процеси, що відбуваються при перетворенні теплоти в роботу, і насамперед обов'язкові для теплової машини зміни стану робочого тіла.

Поставимо новий дослід. Для цього передусім підберемо найзручніше робоче тіло. Металевий стержень, як у нашому першому досліді, не застосовується як робоче тіло в промислових теплових двигунах, бо метал, навіть нагрітий до дуже високої температури, лише незначно змінює свій об'єм. Це пояснюється тим, що частинки твердих тіл великою мірою зв'язані силами зчеплення і їх тепловий рух обмежується коливаннями коло вузлів кристалічної решітки. Інакше стоїть справа в газах, молекули яких рухаються вільніше, а міжмолекулярні відстані значно більші. Тому й теплове розширення газів далеко значніше, ніж у твердих тіл.

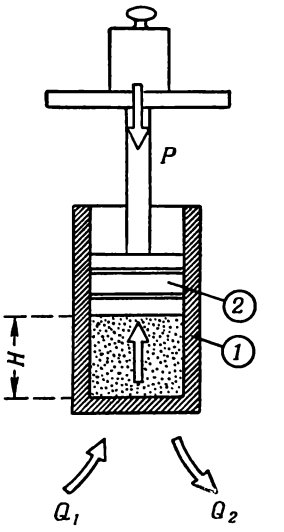


Рис. 4. Найпростіший тепловий двигун з газоподібним робочим тілом.

На рис. 4 зображено найпростіший тепловий двигун, робочим тілом якого є газ. Цей двигун являє собою циліндр *1* з рухомим поршнем *2*, рухи якого змінюють об'єм газу в порожнині циліндра, тому по переміщенню поршня ми маємо можливість судити про зміну об'єму газу. Навантажуючи поршень тягарями різної величини, ми зможемо мати в порожнині циліндра бажаний тиск. А знаючи значення об'єму, ми можемо обчислити і питомий об'єм, а знаючи питомий об'єм і тиск, можемо з рівняння стану визначити і третій параметр — температуру. Таким чином, наш найпростіший двигун, з одного боку, наближається до дійсних (мотоциклетний двигун має один або два циліндри з поршнями), а з другого боку — до лабораторного приладу, поданого на рис. 2. Наш найпростіший двигун дає можливість діставати безпосередньо з досліду і значення величини роботи двигуна, що цікавить нас. Справді, при зміні об'єму поршень проходить певний шлях в напрямі дії сили (ваги тягаря на поршні і самого поршня), а нам відомо з фізики, що добуток двох цих величин дає нам величину роботи.

Зміни тиску та об'єму, безпосередньо вимірюваних у нашому досліді, зручно простежити графічно, на діаграмі. Діаграма — один з найкращих методів наукового та технічного дослідження. Звертаючись до діаграми, ви тим самим починаєте оволодівати науковим знаряддям пізнання, робите великий крок у розвитку вашого наукового мислення.

На рис. 5 показано, як можна перейти від фізичних процесів, що відбуваються в робочому тілі, вміщеному в порожнині циліндра, до графічного зображення цих процесів. Для цього

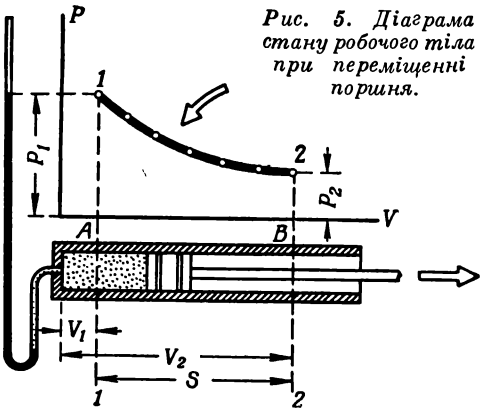


Рис. 5. Діаграма стану робочого тіла при переміщенні поршня.

треба взяти циліндр з поршнем (можна використати садовий обприскувач). До вихідного отвору циліндра за допомогою гумової трубки треба приєднати ртутний або водяний манометр у вигляді вигнутої скляної трубки. По висоті рідини в цій трубці ми можемо судити про тиск робочого тіла (наприклад, повітря), а по положенню поршня — про об'єм.

Почнемо наш дослід. Перемістимо поршень з положення, позначеного буквою *A*, у положення, позначене буквою *B*. Це означає, що об'єм газу змінився від величини V_1, поданої в якомусь масштабі відрізком лінії на діаграмі, до величини V_2. Змінився й тиск. При положенні поршня *A* тиск мав величину, відкладену на нашій діаграмі у вигляді відрізка p_1, пропорціонального висоті рідини в трубці манометра, а при положенні поршня *B* став відповідати відрізку p_2.

На нашій діаграмі ми дістали дві точки: *1* і *2*. Кожна з цих точок буде показувати стан робочого тіла при знаходженні поршня в точках *A* і *B*. Таким чином, на діаграмі ми ніби бачимо на власні очі невидимий в дійсності стан робочого тіла. Більш того, змінюючи потроху положення поршня і наносячи на діаграму значення об'єму і тиску для кожного його положення, ми дістанемо ряд проміжних точок. З'єднавши ці точки плавною лінією, ми «побачимо» процес змінювання стану.

Уміння «бачити» невидимий процес має величезне значення в розвитку будь-якої науки. Щодо теплових двигунів, то, діставши за допомогою особливого приладу — індикатора — запис процесів, що відбуваються в циліндрі двигуна, інженери на підставі такої індикаторної діаграми можуть судити про роботу двигуна. І навпаки, для ще не існуючого двигуна, задуманого конструктором, викреслюється заздалегідь теоретично розрахована діаграма, а по ній цілком безпомилково обчислюються розміри та міцність частин майбутнього двигуна.

На нашій діаграмі паралельно горизонтальній осі відкладаються значення питомих об'ємів робочого тіла, а паралельно вертикальній осі — відповідні значення його тисків. Тому така діаграма називається *pv*-діаграмою, або діаграмою в *pv*-координатах.

pv-діаграма дає можливість судити не лише про характер процесу змінювання стану робочого тіла, але й про саму роботу. Щоб переконатися в цьому, поставимо дослід з нашим двигуном таким чином, щоб при збільшенні об'єму, викликаного рухом поршня, тиск лишався сталим. Для цього нам доведеться під час руху поршня підігрівати робоче тіло, стежачи за тим, щоб висота стовпчика рідини в нашому манометрі лишалася незмінною. В результаті розширення при постійному тиску *P* ми дістанемо зображення нашого процесу у вигляді прямої лінії *1—2* (рис. 6), що відповідає пройденому поршнем шляху *S*.

Розглянемо заштрихований прямокутник *1—2—3—4*. Чому дорівнює заштрихована площа? За правилами геометрії, вона дорівнює добутку основи на висоту, тобто добутку відрізка *1—2* на відрізок *1—4*. Але відрізок *1—4* в якомусь масштабі зображає тиск *P*, а відрізок *1—2* — зміну об'єму, що відповідає шляху *S*, пройденому поршнем. Ми знаємо, тиск вимірюється силою, діючою на один квадратний сантиметр площі поршня; помноживши тиск на площу поршня, дістанемо силу, що діє на весь поршень нашого двигуна. Помноживши силу на шлях, пройдений поршнем, дістанемо роботу. Таким чином, величина площі заштрихованого чотирикутника *1—2—3—4* є не що інше як робота, виконувана машиною протягом процесу розширення робочого тіла.

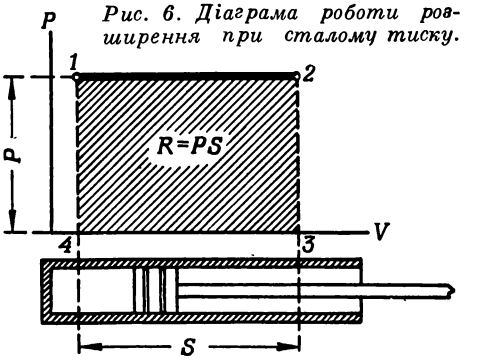


Рис. 6. Діаграма роботи розширення при сталому тиску.

Наш висновок залишається справедливим для площадки будь-якої форми, і прямокутна площадка була вибрана нами лише для простоти доведення. Поданий на рис. 7 процес *1—2* у *pv*-координатах також зображає роботу у вигляді заштрихованої на рисунку площадки під кривою процесу. Так, діаграма дає нам можливість графічно уявити та підрахувати кількість роботи, одержаної при тому чи іншому процесі змінювання стану робочого тіла.

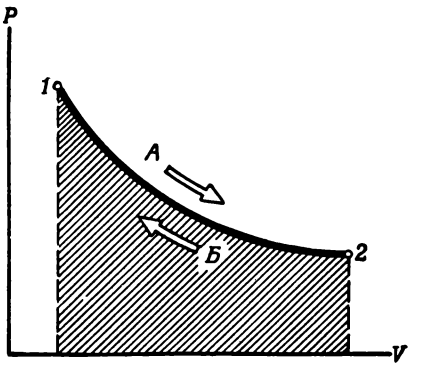


Рис. 7. Прямий і зворотний процеси.

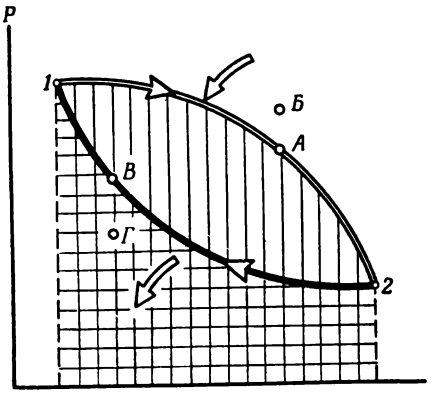


Рис. 8. Цикл теплового двигуна.

Одержаної? А звідки це видно? Можливо, навпаки, треба виконувати роботу, подану площадкою, щоб дістати процес, зображений лінією *1—2*.

На це питання неважко дати відповідь. Знак роботи (тобто чи виконана вона тілом чи над тілом) визначається напрямом процесу. Ми бачили ще на першому досліді з стержнем, що роботу маємо при розширенні робочого тіла. І, навпаки, стискання робочого тіла можна досягти, виконавши роботу над тілом. У цьому неважко переконатися, розглянувши рис. 4, з якого видно, що для опускання поршня треба натиснути на нього, тобто виконати роботу. Звідси легко запам'ятати просте правило: якщо процес відбувається з розширенням робочого тіла, із збільшенням його об'єму (що відповідає рухові по стрілці *А* на рис. 7), то площадка під лінією процесу становитиме додатну, тобто виконану тілом, роботу.

Якщо ж процес відбувається із стисканням робочого тіла, із зменшенням його об'єму (що відповідає рухові по стрілці *Б*), то площадка під лінією процесу становитиме від'ємну, тобто виконану над тілом, роботу. Учені умовились процеси, при яких тіло виконує роботу, називати прямими, а процеси, при яких робота виконується над тілом, — зворотними.

Так, на рис. 7 процес, що відбувається по стрілці *А*, буде прямим, а по стрілці *Б* — зворотним.

При першому досліді з стержнем ми встановили, що тепловий двигун — це періодично діючий двигун: у ньому періодично чергуються процеси розширення і процеси стискання, які повертають робоче тіло до початкового стану. Тепер ми зможемо побачити на *pv*-діаграмі виразну картину роботи періодично діючого теплового двигуна, причому діаграма покаже нам шляхи до найвигіднішої роботи, до найвищої ефективності нашого теплового двигуна.

Для цього розглянемо діаграму на рис. 8, на якій у *pv* -координатах зображено два процеси: прямий, поданий подвійною лінією, і зворотний, зображений простою лінією.

Припустимо, що подвійну лінію ми дістали в результаті вимірювання об'ємів і тисків при процесі, що відбувався в порожнині циліндра (рис. 4), коли ми підводили до робочого тіла теплоту Q_1 і дістали роботу підіймання вантажу на висоту H. На рис. 8 ця робота подана заштрихованою вертикальними лініями площадкою під подвійною лінією процесу розширення газу.

Але тепловий двигун — двигун періодичної дії. Тому для дальшої його роботи потрібно повернути робоче тіло до початкового стану. На нашій діаграмі він зображений точкою *1* з відповідними їй значеннями питомого об'єму і тиску.

Як це зробити? Очевидно, потрібно стиснути робоче тіло до початкового об'єму і початкового тиску, перейти від стану, показаного точкою *2*, до стану, показаного точкою *1*. Цей перехід можна виконати багатьма шляхами, чому відповідатиме багато ліній, які сполучають точки *2* і *1* на нашій діаграмі.

Припустимо, що ми повернулись у точку *1* тим же самим шляхом, яким відбувався процес, тільки в зворотному напрямі. Площадка під подвійною лінією, що являє собою роботу, одержану при розширенні від точки *1* до точки *2*, одночасно становитиме роботу, затрачену на стискання від точки *2* до точки *1*. А коли одержана і затрачена робота дорівнюють одна одній, то ми не матимемо ніякої зовнішньої роботи від нашого двигуна. Для того щоб її

мати, треба, очевидно, щоб затрачена на стискання робота була меншою від одержаної при розширенні. Для цього необхідно, щоб *лінія зворотного процесу проходила нижче від лінії прямого процесу*, так, наприклад, як показано на рисунку суцільною лінією між точками *1* і *2*. Тоді робота стискання, подана площадкою, заштрихованою горизонтальними лініями, буде меншою, ніж робота розширення. На яку величину? Якраз на таку, яку подано площадкою між подвійною і суцільною лініями.

Тепер ми можемо зробити дуже важливий висновок. Два процеси, зображені на рис. 8, при чергуванні яких робоче тіло періодично повертається у початковий стан, являють собою цикл роботи теплового двигуна. Уся його робота складається з повторення подібних циклів, так що, знаючи цикл, ми знаємо і роботу двигуна. Виявляється, що в *pv-діаграмі площадка, окреслена циклом, являє собою одержану зовнішнім споживачем корисну роботу*. Очевидно, чим більшою буде ця площадка, тим продуктивнішим буде наш двигун. А щоб ця площадка була більшою, треба, щоб подвійна лінія прямого процесу проходила на діаграмі якнайвище, а суцільна лінія зворотного процесу — якнайнижче.

Це легко накреслити на діаграмі, але як цього добитися в реальному двигуні?

Ми вже знаємо, що «вище» або «нижче» на діаграмі означає в реальній машині вищий або нижчий тиск. Що значить, наприклад, підняти на нашому рисунку точку A в положення $Б$? Це означає підвищити тиск робочого тіла. А як можна підвищити тиск робочого тіла при сталому об'ємі? Тільки нагріваючи робоче тіло, підводячи до нього теплоту, підвищуючи його температуру, його внутрішню енергію. Чим сильніше ми нагріємо робоче тіло, тим більшу кількість теплоти Q_1 підведемо до нього, тим вище пройде на діаграмі подвійна лінія прямого процесу, тим більшою буде площадка, яка являє собою роботу розширення.

А що означає опустити на нашому рисунку точку B в положення $Г$? Це означає знизити тиск робочого тіла. При сталому об'ємі це можна зробити, тільки охолоджуючи робоче тіло, відводячи від нього теплоту Q_2, знижуючи його температуру, зменшуючи величину його внутрішньої енергії. Чим сильніше охолодимо ми робоче тіло в процесі розширення, тим нижче пройде лінія оберненого процесу, тим більшу кількість теплоти буде перетворено в роботу і меншу — передано холодному джерелу.

Проведене за допомогою діаграм дослідження підтверджує наш висновок з першого досліду із стержнем про циклічність у роботі теплових двигунів, про необхідність двох джерел теплоти для одержання механічної роботи. Більш того, тепер нам відомо, що чим більше теплоти ми зуміємо підвести до кожного кілограма робочого тіла від верхнього джерела і чим менше відвести до нижнього, тим ефективніше буде працювати наш тепловий двигун.

Якщо ми зуміли підвести до кожного кілограма робочого тіла за цикл Q_1 калорій теплоти, а передати в холодильник Q_2 калорій, то їх різниця становитиме теплоту, перетворену в механічну роботу: $Q_1 - Q_2$ відповідає механічній роботі, виконаній тілом.

Яку ж частину з відданої робочому тілу теплоти Q_1 удалось перетворити в механічну роботу, відповідну до різниці $Q_1 - Q_2$?

Очевидно, ця частка становитиме:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Одержана нами проста формула показує коефіцієнт корисної дії теплового двигуна (скорочено к. к. д). Величина к. к. д. указує на те, яку частину теплоти, підведеної до робочого тіла, ми зуміли перетворити в роботу.

Які висновки можна зробити з цієї важливої формули?

Якщо $Q_1 = Q_2$, то коефіцієнт корисної дії дорівнюватиме нулю. Це означає, що вся теплота, надана робочому тілу, пройшла через нього в холодильник, не перетворюючись у роботу. На рис. 8 це відповідає тому випадку, коли прямий і зворотний процеси проходять по одній і тій самій кривій.

Якщо $Q_2 = 0$, то величина к. к. д. дорівнюватиме 1. Це означає, що вся теплота, передана робочому тілу, перетворена в роботу. Чи не суперечить це відомому нам другому законові термодинаміки, який полягає в тому, що тепловий двигун, який періодично працює, не може всю підведену до нього теплоту перетворити в роботу? Ні, не суперечить, бо для здійснення циклу з $Q_2 = 0$ потрібно мати холодильник з температурою, яка дорівнює абсолютному нулю, що неможливо.

Коефіцієнт корисної дії теплових двигунів у період їх виникнення становив тільки тисячні частки від використовуваної теплоти, а тепер у найкращих двигунів досягає 40%. У нашого ж мотоцикла к. к. д. не перевищує 15%.

Перше наше ознайомлення з циклом теплового двигуна показало доцільність збільшення

різниці верхнього і нижнього температурних рівнів джерел теплоти. Чим вищий у теплових двигунах температурний перепад, тобто різниця між температурою T_1 «верхнього» джерела і температурою T_2 «нижнього» джерела, тим більшу роботу може виконати тепловий двигун. Тому в техніці прагнуть підвищувати температуру (а в парових двигунах і тиск) початкового стану робочого тіла.

Якщо перші теплосилові установки XVIII ст. працювали за допомогою пари, що мала при вході в двигун температуру 100°С і тиск 1 *атм*, то тепер передова техніка нашої країни має справу з температурою пари 600°С і тиском 150 *атм*, а в недалекому майбутньому почнуть працювати теплові двигуни з температурою 650°С і тиском 300 *атм*.

З другого боку, робиться все, щоб якнайбільше знизити температуру T_2. Для цього найчастіше користуються водяним охолодженням, використовуючи природні і споруджуючи штучні водойми або величезні баштові водоохолоджувачі.

Чи означають наші висновки про значення температур T_1 і T_2, що будь-який тепловий двигун, який працює при однакових значеннях T_1 і T_2, даватиме один і той самий ефект, матиме один і той самий к. к. д.? Ні, не означають. Подібно до того, як між двома рівнями падання води можна спорудити і старовинне водяне колесо, яке більше розбризкує воду, ніж доцільно використовує її, і сучасну гідравлічну турбіну, де не пропадає марно енергія жодної краплі води, так і в теплових двигунах між двома температурними джерелами можна спорудити двигуни з різними к. к. д.

Адже між точками *1* і *2* на рис. 8 можна провести нескінченну кількість найрізноманітніших кривих і дістати таку ж саму безліч циклів, причому таких, які шляхом різноманітних комбінацій нагрівання, охолодження, розширення і стискання можуть бути здійснені в справжній машині. Коефіцієнти корисної дії всіх цих двигунів, які працюють в умовах одного й того самого температурного перепаду, будуть різні. І серед усіх цих к. к. д. є один, який має найбільше значення і вказує на найкращий спосіб перетворення теплоти в механічну роботу. Цей спосіб і відповідний йому цикл були розроблені французьким інженером Саді Карно ще в 1824 р. і дістали в науці назву «цикл Карно».

Цей цикл спрощено подано на рис. 9. Виявляється, для одержання найвищого к. к. д. в даній межі між температурами T_1 і T_2 треба

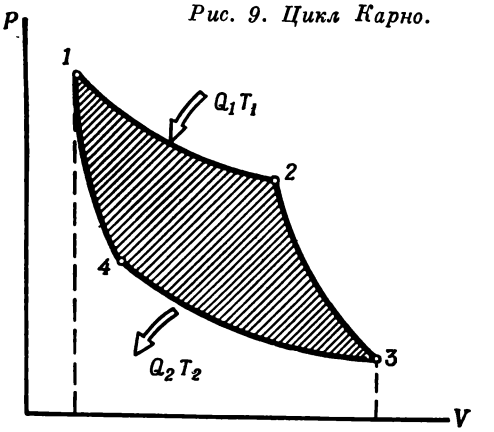


Рис. 9. Цикл Карно.

провести цикл, що складається з чотирьох окремих процесів, два з яких прямі *(1—2* і *2—3)* і два обернені *(3—4* і *4—1)*.

Процес *1—2* проводиться так, щоб розширення з підведенням теплоти Q_1 відбувалося б при сталій температурі, яка дорівнює температурі верхнього джерела T_1. При такому процесі, що зветься ізотермічним (рівнотемпературним), температура робочого тіла залишається сталою, так само як і його внутрішня енергія, що визначається температурою тіла. За першим законом термодинаміки, уся підведена в ізотермічному процесі теплота перетворюється в роботу. Але для роботи теплового двигуна одного процесу не досить. Потрібний цикл, а для здійснення циклу періодично діючого теплового двигуна необхідно повернутись до початкового положення робочого тіла. Тому в точці *2* ізотермічний процес припиняють, припиняють підведення теплоти від «верхнього» джерела і дають можливість робочому тілу розширитись до точки *3* ізольовано, без підведення і відведення теплоти. Такий процес називається адіабатичним, і одержувана тут робота відбувається лише за рахунок внутрішньої енергії робочого тіла.

Далі йдуть обернені процеси. Перший з них, *3—4*, проводиться ізотермічно при сталій температурі «нижнього» джерела T_2. Тому що температура стала, то віддана нижньому джерелу теплота Q_2 відповідає роботі, виконаній по стисканню робочого тіла. Потім стискання тіла продовжується ізольовано (адіабатично) на дільниці *4—1*. Тепер робота по стисканню тіла йде на підвищення температури і, таким чином, на збільшення внутрішньої енергії робочого тіла з таким розрахунком, щоб температура тіла досягла свого початкового значення, яке відповідає точці *1*.

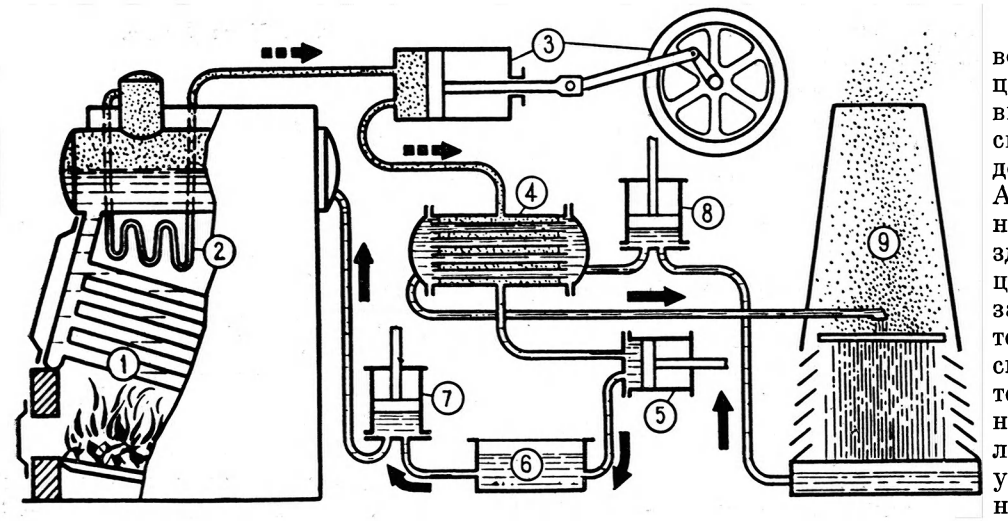


Рис. 10. Схема теплосилової установки (ТСУ).

Пара утворюється в паровому котлі 1 і перегрівається в пароперегрівнику 2; відпрацювавши в двигуні 3, пара конденсується в конденсаторі — холодильнику 4; конденсатний насос 5 подає конденсат в конденсатний бак 6, звідки він живильним насосом високого тиску 7 подається в котел, завершаючи цикл змін стану робочого тіла. Джерелом охолодження служить вода, що її переганяє циркуляційний насос 8 через трубки конденсатора — холодильника. В охолоджувальному пристрої 9 нагріта вода віддає своє тепло атмосферному повітрю і знову подається в конденсатор.

Таким є цикл Карно, який дає найвищий ефект. Проте в реальних теплових двигунах існує ряд умов, таких, як властивості робочих тіл, теплообмін між стінками циліндра і робочим тілом, наявність роботи проти сил тертя і т. д., які роблять зручнішими інші цикли. Але для визначення їх ефективності незмінно служить цикл Карно.

Цикл Карно має ще одну велику перевагу: він дає можливість виразити к. к. д. теплового двигуна через температуру верхнього і нижнього джерел теплоти. Тому що в циклі Карно підведення і відведення теплоти проводиться при сталих температурах T_1 і T_2, то для нього формула к. к. д., подана раніше, може бути виражена таким способом:

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

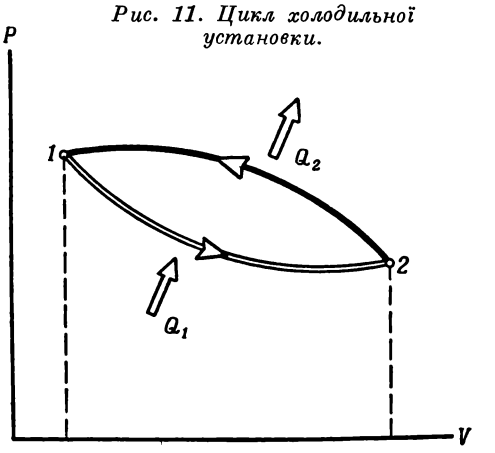
З цієї формули виразно видно вигідність підвищення T_1 і зниження T_2, відзначену нами раніше. Так само виразно видно і природні межі к. к. д. теплового двигуна. Він не може дорівнювати одиниці, бо для цього потрібно було б, щоб температура T_2 дорівнювала абсолютному нулю, що неможливо. Далі, якщо $T_1 = T_2$, то к. к. д. дорівнює нулю, що підтверджує другий закон термодинаміки, який доводить, що неможливо мати роботу при наявності тільки однієї температури.

Здійснення теплового циклу на практиці в мільйонах теплових двигунів—справа складна і належить до області техніки. Але кілька загальних положень про здійснення теплового циклу слід висловити зараз. Перетворення теплоти в роботу здійснюється у так званих теплосилових установках, до яких належать і потужні установки електричних станцій, і транспортні установки — від тих, що рухають океанські судна, до тих, якими приводять в рух моторолери. У всіх цих установках можна виділити окремі частини, призначені для здійснення відповідних процесів теплового циклу.

На рис. 10 подано схему паросилової установки. Так називається теплова установка, де робочим тілом є водяна пара. Паросилові установки являють собою основу потужних сучасних теплових електростанцій.

У найпростішому випадку паросилова установка складається з парового котла з пароперегрівником, парового двигуна (парової машини або турбіни), конденсатора-холодильника, охолодного пристрою, конденсатного бака, живильного, конденсатного і циркуляційного на-

Рис. 11. Цикл холодильної установки.



сосів, тобто з дев'яти окремих складних пристроїв. Сучасна потужна паросилова установка споруджується у вигляді так званого «блока», який складається в основному з котла, парової турбіни і генератора електричного струму.

Розглянемо тепер так званий о б е р н е н и й ц и к л. Він відрізняється від розглянутих вище прямих циклів тим, що у нього (рис. 11) прямий процес (подвійна лінія) — процес розширення робочого тіла —розташований нижче, ніж обернений процес, тобто процес стискання (суцільна лінія). Якщо тепер зіставити площі, що відповідають роботі, як ми це робили для прямого циклу (рис. 8), то вийде, що площа, розташована між лініями прямого і оберненого процесів, тепер буде зображати не виконану тілом, а виконану над тілом роботу. Навіщо ж це робити? А хіба ніколи не виникає потреби виконати роботу для того, щоб підняти воду, хіба не будують водяні насоси? Так само і в теплотехніці виникає потреба розв'язати обернену задачу, задачу підняття.

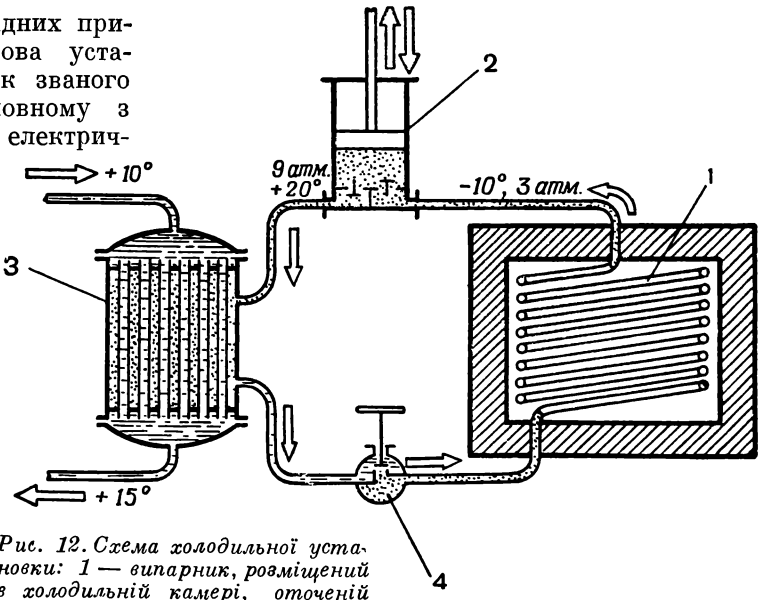


Рис. 12. Схема холодильної установки: 1 — випарник, розміщений в холодильній камері, оточеній шаром ізоляції; 2 — компресор, в якому за рахунок стискання підвищується тиск і температура холодоагенту; 3 — конденсатор, в якому холодоагент віддає тепло циркулюючій воді, трохи підвищуючи її температуру; 4 — регулюючий вентиль, за яким холодоагент розширюється і температура його знову спадає.

Чого? Теплоти. Куди? Туди, куди вона сама собою в природі ніколи не рухається — від низьких температур до вищих,— подібно до того, як вода не тече знизу вгору. Це необхідно для охолодження тіл.

Ви встановили холодильник і включили його. Всередині у нього температура знижується. Куди ж виходить з нього теплота? Назовні, більше нікуди. Але зовні температура вища, ніж в холодильнику. Отже, теплота йде від тіла з низькою температурою до тіла з вищою, чого в природі ніколи не спостерігається. Це не означає, що наш холодильник порушує закони природи. Подібно до насоса, який піднімає воду вгору, ми в холодильнику виконуємо роботу, передаємо теплоту від холоднішого тіла гарячішому. Так здійснюється зворотний цикл, при якому двигун перетворюється в «тепловий насос».

Обернений цикл, як і прямий, здійснюється в кількох окремих частинах (рис. 12).

Робочим тілом холодильних установок є так званий х о л о д о а г е н т — речовина, що кипить при температурі, нижчій від нуля градусів. Коли така речовина випаровується у випарнику холодильної установки, теплота з камери зберігання продуктів іде через стінки трубок до холодоагенту, підтримуючи процес випаровування. Але як передати теплоту навколишньому середовищу (воді, повітрю), якщо температура нагрітого холодоагенту далеко нижча від температури середовища? Для цього холодоагент направляють у компресор і дуже стискають. Від стиску температура холодоагенту підвищується, і тепер стає можливим передати теплоту охолодній воді, що протікає по трубках конденсатора, який називається так тому, що стиснутий холодоагент, віддаючи теплоту воді, переходить у рідкий стан, конденсується. Як тепер знизити температуру холодоагенту настільки, щоб вона знову стала нижчою, ніж температура в камері зберігання продуктів? Для цього холодоагент піддають процесу розширення у так званому р е г у л ю в а л ь н о м у к л а п а н і, де холодоагент через вузький отвір потрапляє у великий об'єм трубок випарника. Об'єм збільшується, тиск і температура спадають. Цикл закінчено. Він повторюється знов і знов, і з кожним циклом холодоагент, якого підганяє робота компресора, переносить теплоту від камери зберігання до води, що охолоджує конденсатор. У кімнатних холодильниках охолодним середовищем є повітря, якому передається теплота, «викачана» компресором з камери холодильника.

Закони термодинаміки управляють не тіль-

ки роботою теплових двигунів і холодильних установок. Термодинамічні процеси величезних масштабів безперервно здійснюються на нашій планеті, яка являє собою своєрідну теплосилову установку.

Атмосферне повітря — перше робоче тіло Землі — дістає теплоту від Сонця у вигляді випромінювання. Нагріваючись, це робоче тіло розширюється, і ми бачимо роботу розширення у вигляді руху величезних мас повітря — вітру. Подібно до того, як різниця тисків над і під поршнем теплового двигуна переміщає поршень, різниця тисків в окремих частинах атмосфери, викликана тепловим розширенням під впливом сонячного випромінювання, переміщає величезний «поршень» у вигляді великих повітряних мас. Колесам вітрових двигунів залишається тільки одержати готову механічну енергію руху повітря, вироблену в атмосфері, як у гігантському тепловому двигуні.

Друге робоче тіло Землі — вода — здійснює цикл парового теплового двигуна. Сприймаючи теплоту сонячного випромінювання, вода випаровується, у багато разів збільшуючи свій об'єм. Під дією повітряних течій, викликаних, як ми бачили, промінням Сонця, пара води у вигляді хмар досягає «холодильників» (ділянок атмосфери, менш нагрітих Сонцем), віддає свою теплоту повітрю, конденсується і у вигляді дощу падає на землю. Течуть ріки, і збудовані на них гідравлічні установки, як і вітряки, беруть від природи вже готову механічну енергію руху, вироблену в земній атмосфері. Мільярди років безупинно працює грандіозний тепловий «двигун», де Сонце — «верхнє» температурне, а Земля — «нижнє» температурне джерела теплоти, а атмосферне повітря і вода океанів та морів — робочі тіла. Складні і різноманітні процеси, що відбуваються в цьому «двигуні», але вони підлягають законам термодинаміки, обов'язковим для них так само, як і для малесенького бензинового моторчика крихкої моделі літака.

Спочатку людина в своїй практичній діяльності застосовувала ці закони, знаючи лише небагато з їх зовнішніх проявів. Спалюючи вугілля в топках перших парових машин, вона нічого не знала про перший закон термодинаміки, який встановлює точне кількісне співвідношення між згорілим вугіллям і одержаною роботою. Охолоджуючи холодною водою пару в парових циліндрах, вона й не підозрювала про існування другого закону термодинаміки, який встановлює необхідність охолодження в процесі одержання роботи за рахунок теплоти.

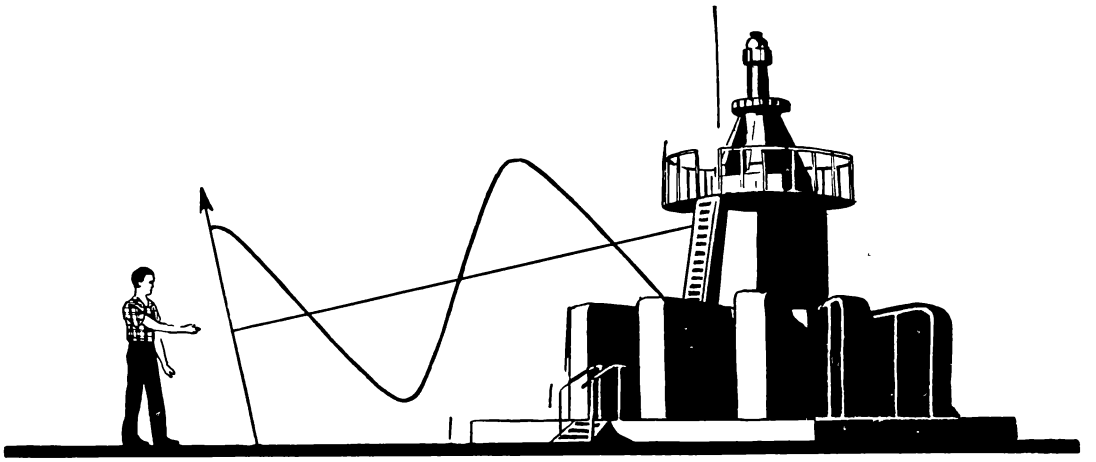
У наші дні, коли багато чого вже стало відомим, учені багатьох країн проводять дальшу систематичну роботу над всебічним дослідженням теплових явищ для того, щоб забезпечити постійний прогрес теплоенергетики.

Одні вчені працюють над розробкою нових, найефективніших практичних термодинамічних циклів для різних теплосилових установок: для парових установок потужних теплових електростанцій, призначених працювати за допомогою пари, тиск якої перевищує 300 *атм*, а температура 650°С; для газових турбін, що обертають пропелери потужних вертольотів МІ-6 та гігантських повітряних кораблів ТУ-114; для різноманітних двигунів внутрішнього згоряння, кількість яких на земній кулі вже перевищила сто мільйонів! А при такому розвитку теплоенергетики кожен процент економії, досягнутий за рахунок удосконалення термодинамічного циклу, дасть понад 20 млрд. *квт-г* річної економії.

Інші вчені розробляють точні рівняння стану для реальних робочих тіл. Вони можуть бути одержані шляхом розрахунків, для чого потрібно дуже глибоко і ясно передбачити, оцінити і описати точною математичною мовою найскладнішу картину взаємодій між молекулами. З багатьох рівнянь стану, які пропонували вчені, найбільшою точністю відзначається рівняння лауреата Ленінської премії проф. М. П. Вукаловича, яке дістало світове визнання.

Багато вчених працює над експериментальним дослідженням властивостей реальних робочих тіл. Вони знаходять не тільки відомі нам параметри p, v і T і зв'язок між ними, але й багато інших властивостей, без знання яких неможливий прогрес теплоенергетики. Так, наприклад, не знаючи в'язкості і теплопровідності робочих тіл, неможливо розрахувати ні їх рух через кілометри трубок і тисячі лопатей, ні передачу мільярдів калорій тепла в котлах, конденсаторах, перегрівачах, випарниках.

Властивості робочих тіл теплосилових і холодильних установок досліджуються в Енергетичному інституті АН СРСР ім. акад. Г. М. Кржижановського (ЕНІН), у Всесоюзному теплотехнічному інституті ім. Ф. Е. Дзержинського (ВТІ), у Центральному котлотурбінному інституті ім. І. І. Ползунова (ЦКТІ), у Московському Ордена Леніна енергетичному інституті (МЕІ) і ряді інших наукових установ. В МЕІ, крім того, готуються кадри інженерів-теплофізиків для дослідницької роботи. Багато праць радянських учених-теплоенергетиків дістали світове визнання.



Електромагнітні явища

ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

Усі навколишні предмети, рослини, тварини, хоч вони й дуже різноманітні, побудовані приблизно тільки з 90 видів найдрібніших частинок — атомів. Ця дивна єдність природи сягає ще далі. Усі атоми в свою чергу побудовані із ще дрібніших частинок, що називаються елементарними. Кількість видів цих елементарних частинок ще менша. До складу атома в основному входять електрони, протони і нейтрони.

Елементарні частинки певним чином впливають одна на одну. Існування певних сил між елементарними частинками спричиняється до того, що вони об'єднуються в більш-менш складні системи — атоми різних видів. І, нарешті, ці самі сили взаємодії викликають зчеплення атомів одного з одним у речовинах.

Незважаючи на дивну різноманітність впливів тіл одно на одного в безмежних просторах Всесвіту, на нашій планеті в будь-якому куску речовини, в живих організмах, у тому числі і в організмі людини, в атомах і, нарешті, в атомних ядрах ми завжди зустрічаємося з проявом сил тяжіння, електричних, магнітних і ядерних.

Вчення про електрику і магнетизм охоплює всю величезну сукупність явищ природи, для перебігу яких основну роль відіграють електромагнітні сили. Важко, майже неможливо на-

звати явище, не зв'язане з дією електромагнітних сил. Тому вивчення їх має дуже важливе значення.

Сили всесвітнього тяжіння відіграють вирішальну роль тільки тоді, коли у взаємодії беруть участь тіла космічних масштабів. Ці сили управляють рухом зір, підтримують стрункий порядок у нашій сонячній системі. Вони ж викликають притягання усіх тіл на Землі до її центра. При взаємодії елементарних частинок, атомів, молекул, невеликих мас речовини сили тяжіння зовсім малі, ними цілком можна знехтувати.

Ядерні сили забезпечують стійкість атомного ядра. Цими силами протони і нейтрони об'єднуються в атомні ядра. Із збільшенням відстані ядерні сили дуже швидко зменшуються. Поза атомним ядром вони практично не позначаються.

«Арена діяльності» електромагнітних сил у природі надзвичайно широка.

Цими силами визначається будова атома: електрони, що обертаються навколо атомного ядра, удержуються біля нього діянням електричних сил. Електричні сили діють і між окремими атомами та молекулами. Сили, що об'єднують атоми в молекули,— хімічні сили — теж мають електромагнітну природу. Таке саме походження і сил зчеплення між атомами і молекулами, сил, що приводять до утворення різних речовин. Правда, в цих випадках сили взаємодії теж досить швидко зменшуються з віддаленням. На відстанях, що перевищують розміри атома в десять раз, вони вже майже не позначаються.

В атомному ядрі між протонами (позитивно зарядженими частинками) діють потужні сили електричного відштовхування. Саме вони надають частинкам великих швидкостей при руйнуванні ядер в реакторах атомної електростанції і коли вибухає атомна бомба.

Нарешті, до електромагнітних явищ належать світло, теплове випромінювання і радіохвилі.

У повсякденному житті і в техніці ми на кожному кроці зустрічаємось з різними проявами електромагнітних сил.

Справді, з якими силами ми маємо справу? Насамперед це сили пружності. Завдяки силам пружності тверді тіла зберігають свою форму, а рідкі — свій об'єм. Ці ж сили перешкоджають зменшенню об'єму газу. Далі, сили тертя і в'язкості, які гальмують рух тіл, рідин і газів. Нарешті, сила наших м'язів. Усі ці сили, хоч вони й дуже різні, мають спільну електромагнітну природу.

Усім відомо також, як широко застосовуються електромагнітні явища в техніці: електричне освітлення, зв'язок, електродвигуни, найскладніші радіотехнічні прилади, швидкодіючі обчислювальні машини і т. д. Наш вік — це вік електрики.

Чому електромагнітні сили так поширені всюди? Чому вони такі різноманітні? Передусім справа в тому, що всі атоми в основному побудовані з електрично заряджених частинок: електронів і протонів. З другого боку, ці сили значно перевищують сили тяжіння і діють на багато більших відстанях, ніж ядерні. Наприклад, в атомі водню електрична сила взаємодії між електроном і ядром в 10^{42} раз більша, ніж сила тяжіння між ними.

Різноманітність проявів електромагнітних сил визначається фактом існування електричних зарядів двох типів: позитивних і негативних. Негативний заряд несуть на собі в основному легкі елементарні частинки — електрони, а позитивний — в 1836 раз важчі протони. Величина електромагнітних сил залежить не тільки від відстані між зарядами, як у сил тяжіння, але й від стану їх руху, зокрема від швидкості. В цьому полягає ще одна важлива причина різноманітності проявів цих сил.

Усі електромагнітні явища можна пояснити діянням порівняно небагатьох загальних законів.

Тепер ми поведемо розповідь про найголовніше. Що являють собою основні закони електромагнітних явищ? Як удалось їх відкрити? Як з їх допомогою вчені пояснюють різні явища природи? Як використовують їх для практичних цілей?

Сотні томів присвячено дослідженню електромагнітних явищ, і ще сотні томів напишуть. Тому й не дивно, що багато дечого в нашій короткій розповіді ми не зачепимо.

НАРОДЖЕННЯ НАУКИ

Ми не знаємо, коли люди вперше виявили, що тіла можна привести в особливий стан — наелектризувати. Сталося це дуже давно. Вперше в VI ст. до н. е. описав цей факт грецький філософ Фалес Мілетський. За словами вченого, ткалі помітили, що потертий об шерсть янтар притягує до себе легкі предмети, не доторкаючись до них.

Виявляється, що таку властивість має не тільки янтар. Якщо провести кілька разів

гребінцем по сухому волоссю, то він почне притягувати дрібні клаптики паперу. Тіла в такому стані називають наелектризованими.

У цих найпростіших дослідах люди вперше натрапили на очевидний прояв електричних сил. Проте минуло понад два тисячоліття, перш ніж почали систематично досліджувати електрику і відкрили закон взаємодії наелектризованих тіл. Дивна властивість янтарю і деяких інших предметів здавалась цікавим курйозом. Нікому й на думку не спадало, що тут у найпростішій формі виступають закони, які управляють ходом більшості явищ на Землі.

Тепер ми добре знаємо, що відбувається під час електризації тіла. Найбільш рухомі заряджені частинки — електрони — під час тертя переходять з одного тіла на інше. Тіло, яке дістає надмір електронів, заряджається негативно, а те, що втратило електрони, — позитивно. Закон взаємодії заряджених тіл, що перебувають у спокої одно відносно одного, відкрив Кулон наприкінці XVIII ст.

Очевидно, що не можна дати загальний закон взаємодії для заряджених тіл довільних розмірів і форми, бо сила взаємодії залежить від форми і взаємного розміщення тіл. Розміри і тіл та їх взаємне розміщення можуть бути нескінченно різноманітними. Проте досвід показує, що коли розміри заряджених тіл багато менші, ніж відстань між ними, то сила взаємодії не залежатиме від форми і розміру заряджених тіл. Саме для цього випадку і було встановлено закон, який має загальне значення.

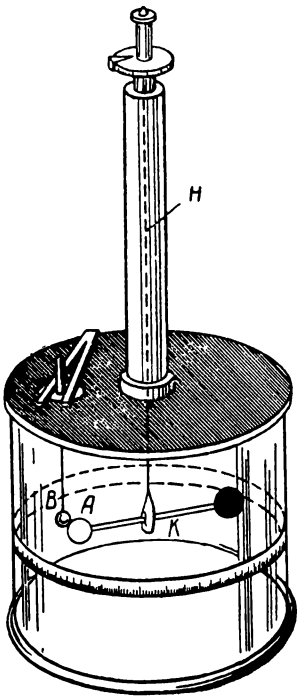


Рис. 1. Крутильні терези Кулона.

Для дослідження взаємодії зарядів Кулон сконструював спеціальний прилад — крутильні терези, зображені на рис. 1. За допомогою цього приладу можна досліджувати взаємодію маленьких заряджених кульок A і B. Кулька B закріплена нерухомо, а кулька A з допомогою коромисла K підвішена на довгій пружній нитці H. Закручуючи цю нитку обертанням головки приладу, можна зменшувати відстань між кульками, а за кутом закручування нитки судити про величину сили взаємодії кульок. В результаті цих дослідів Кулон встановив, що сила взаємодії зменшується обернено пропорціонально квадрату відстані, тобто зменшується, скажімо, в чотири рази, коли відстань збільшується вдвоє. Крім того, ця сила залежить від величини зарядів кульок. Це можна встановити так. Торкнемося кульки B (або A) іншою незарядженою кулькою тих самих розмірів. Тоді заряди розподіляться порівну і, отже, заряд кульки B зменшиться вдвоє. Дослід показує, що і сила взаємодії зменшується вдвоє. Повторюючи цей експеримент, можна переконатися, що сила пропорціональна добутку зарядів.

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

Як же взаємодіють два заряди? Спочатку вважали, що заряди безпосередньо через пустоту діють один на одного. Кожний заряд на відстані «відчуває» наявність другого. Це була так звана «теорія далекодії».

Рис. 2. Схема взаємодії електричних зарядів за «теорією далекодії». Між зарядами нічого немає.

На рис. 2 зображено два заряди. Якщо перемістити заряд B, то сила, що діє на заряд A, зміниться, хоч ніяких змін з зарядом A і простором навколо нього не сталося. Таке уявлення, очевидно, незадовільне. Зміну сили, з точки зору «теорії далекодії», можна сприйняти тільки як «чудо». Правда, «чудо», яке підлягає певному кількісному закону.

Великою заслугою англійського фізика Майкла Фарадея — основоположника сучасних уявлень про електромагнетизм — було те, що він запровадив зовсім нове поняття — поняття електричного поля. Згідно з його ідеєю, заряди не діють один на одного безпосередньо. Кожний з них створює в навколишньому просторі електричне поле. Величина електричного поля зменшується в міру віддалення від за-

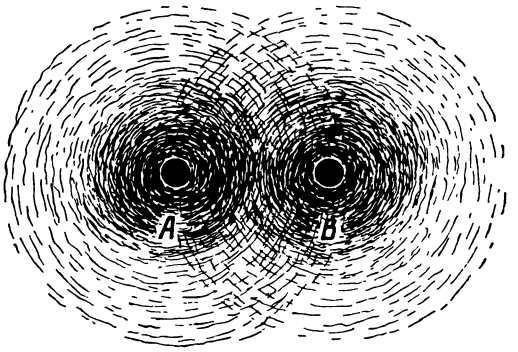


Рис. 3. Схема взаємодії електричних зарядів за «теорією близькодії». Заряди створюють навколо себе електричне поле.

ряду. На заряд *A* діє не сам заряд *B*, а поле, яке він створює (рис. 3). Тепер не дивно, що переміщення заряду *B* в нове положення змінює силу, яка діє на заряд *A*. Адже при цьому змінюється поле заряду *B* в тій точці, де розміщений заряд *A*. Дія заряду передається в просторі від точки до точки через електричне поле. В цьому полягає «теорія близькодії». З її появою «теорія далекодії» була відкинута.

Що ж таке електричне поле? Його існування в просторі таке ж достовірне, як і існування самих зарядів. Електричне поле — це особливий специфічний стан матерії. Ми не можемо роз'яснити, що таке поле, не розповівши, з чого воно складається: нічого простішого, ніж електричне поле, ми не знаємо, подібно до того, як ми не знаємо нічого простішого, ніж елементарні частинки.

Наше уявлення про те, що́ таке електричне поле, утворюється в результаті практичного дослідження властивостей поля. Основна його властивість полягає в тому, що воно діє на електричний заряд з певною силою. За величиною цієї сили можна судити про величину поля. Вміщуючи той самий електричний заряд в різні частини електричного поля, ми помічаємо, що сила, яка діє на нього, змінюватиметься. Отже, величина поля в різних точках простору буде різна. Величину поля звичайно характеризують силою, яка діє на позитивний заряд, що дорівнює одиниці. Цю характеристику поля називають напруженістю електричного поля. Розподіл електричного поля в просторі можна вважати відомим, якщо ми знаємо напруженість поля в кожній точці.

В ученні про електрику поняття поля відіграє основну роль. Коли встановилось уявлення про поле, центр ваги в дослідженні електромагнітних процесів зосереджується вже на вивченні не самих зарядів, а властивостей простору між ними, заповненого електричним полем. У кожній точці простору поле діє на позитивний заряд з деякою силою, яка має певний напрям. Цей напрям вважають за напрям поля. Силовою лінією називають лінію, дотична до якої в кожній точці показує напрям поля (рис. 4).

Електричне поле безпосередньо не діє на наші органи чуття. Через це, до речі, виникають деякі труднощі, коли треба дати уявлення про поле: адже нелегко переконатися в реальності того, що ми безпосередньо не відчуваємо.

Проте за допомогою не дуже складного досліду ми можемо зробити силові лінії «видимими». Справа в тому, що тверді довгасті частинки гіпсу або іншої речовини, що не проводить електрики, повертаються вздовж поля, розміщаючись якраз по силових лініях.

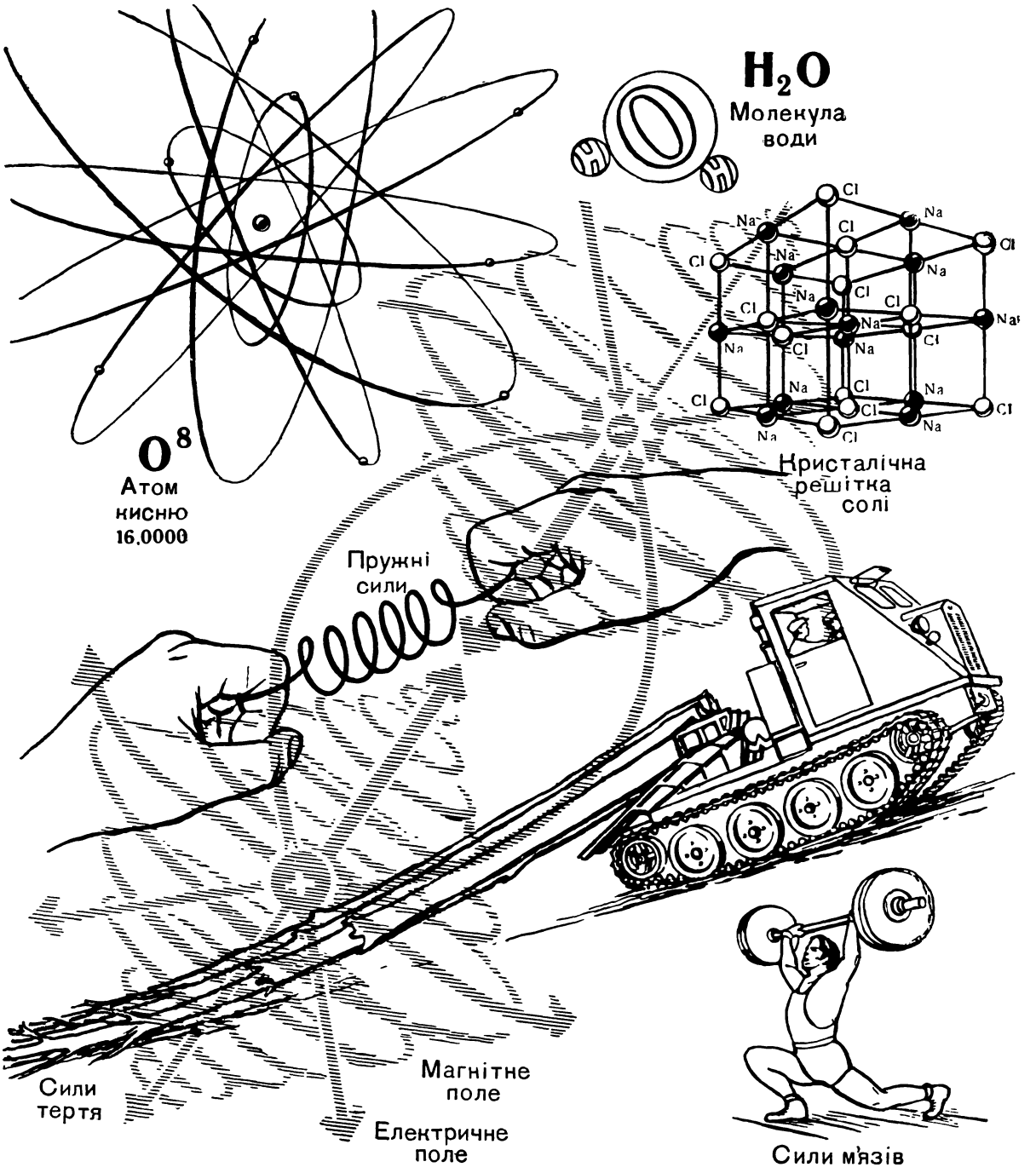
Для повного успіху досліду треба скористатися електричною машиною, яка може надати тілам досить великий заряд. Щоб сили тертя не заважали частинкам повертатися вздовж поля, їх треба вмістити в рідкий ізолятор, наприклад, у рицину. Повну схему досліду подано на рис. 5. Тіла *а* і *б*, поле між якими вивчають, розміщені у ванночці з прозорим дном. Картина розподілу силових ліній, що виникає у ванночці *(В)*, проектується на екран *(Е)* об'єктивом *(О)*, двома дзеркалами *($Д_1$* і *$Д_2$)* і конденсором *(К)*. На рис. 6 показано кілька прикладів розподілу силових ліній, здобутих зазначеним способом.

Рис. 4. Силова лінія електричного поля.

Цікаво, що електрично нейтральна в цілому система з двох зарядів протилежних знаків створює в навколишньому просторі електричне поле. Правда, в даному разі поле в основному зосереджене між зарядами. Поза простором між зарядами електричні сили виявляються слабо. Якщо при цьому геометричні розміри зарядів значно менші, ніж відстань між ними, то таку систему називають електричним диполем.

Постійне електричне поле має одну важливу властивість, що дає змогу ввести ще одну величину, яка характеризує поле поряд з напруженістю.

Робота, яку виконують сили електричного



Більша частина сил, з якими ми зустрічаємось, має електромагнітну природу.

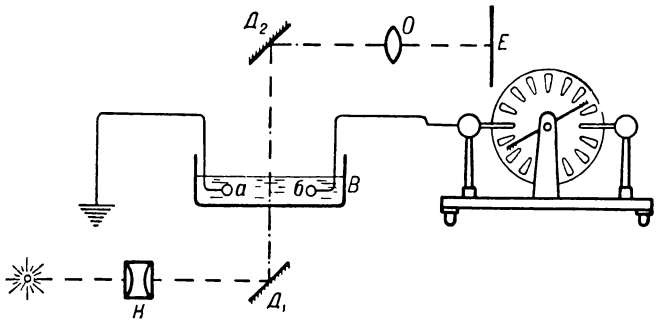


Рис. 5. Схема досліду для створення картини силових ліній електричного поля.

поля при переміщенні заряду з однієї точки простору в іншу, не залежить від форми вибраного шляху (рис. 7). Такі поля називаються потенціальними. Потенціальним є поле тяжіння Землі. Робота, яку треба виконати, щоб підняти тіло над Землею, не залежить від форми шляху підняття, а визначається тільки початковим і кінцевим положенням тіла над Землею — висотою підняття.

Отже, в електричному полі робота при переміщенні даного заряду цілком визначається характером поля і положенням у просторі початкової і кінцевої точок шляху. В свою чергу електричне поле цілком визначено, якщо відома робота по переміщенню одиничного позитивного заряду між двома якими завгодно точками в просторі, зайнятому полем. Ця робота називається різницею потенціалів, або напругою (не плутати з напруженістю!).

Отже, електричне поле можна характеризувати двома величинами: або заданням напруженості в кожній точці простору, або роботою по переміщенню одиничного заряду між двома будь-якими точками — різницею потенціалів. Напруженість — функція однієї точки простору; нова величина — різниця потенціалів — функція двох точок. Обидві величини однозначно зв'язані одна з одною так само, як робота і сила в механіці.

Природно постає запитання: навіщо вводити дві характеристики поля, а не задовольнитися тільки напруженістю? Тим більше, що характеристика поля за допомогою задання сили в кожній точці багато ясніша і наочніша.

Уся справа в тому, що багато які з електричних явищ, а головним чином величина елек-

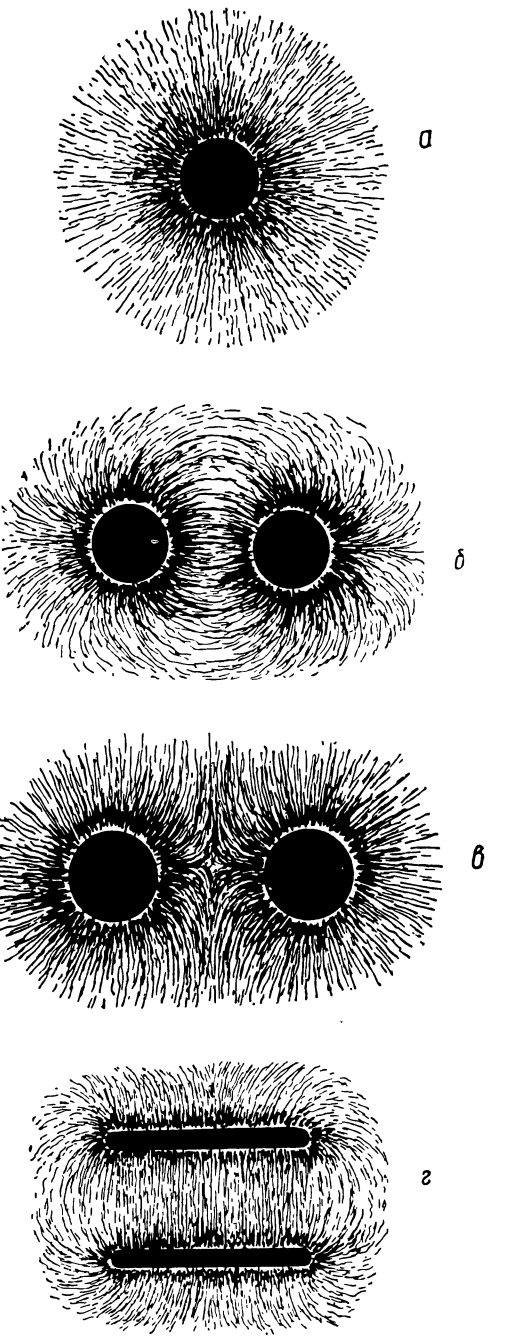
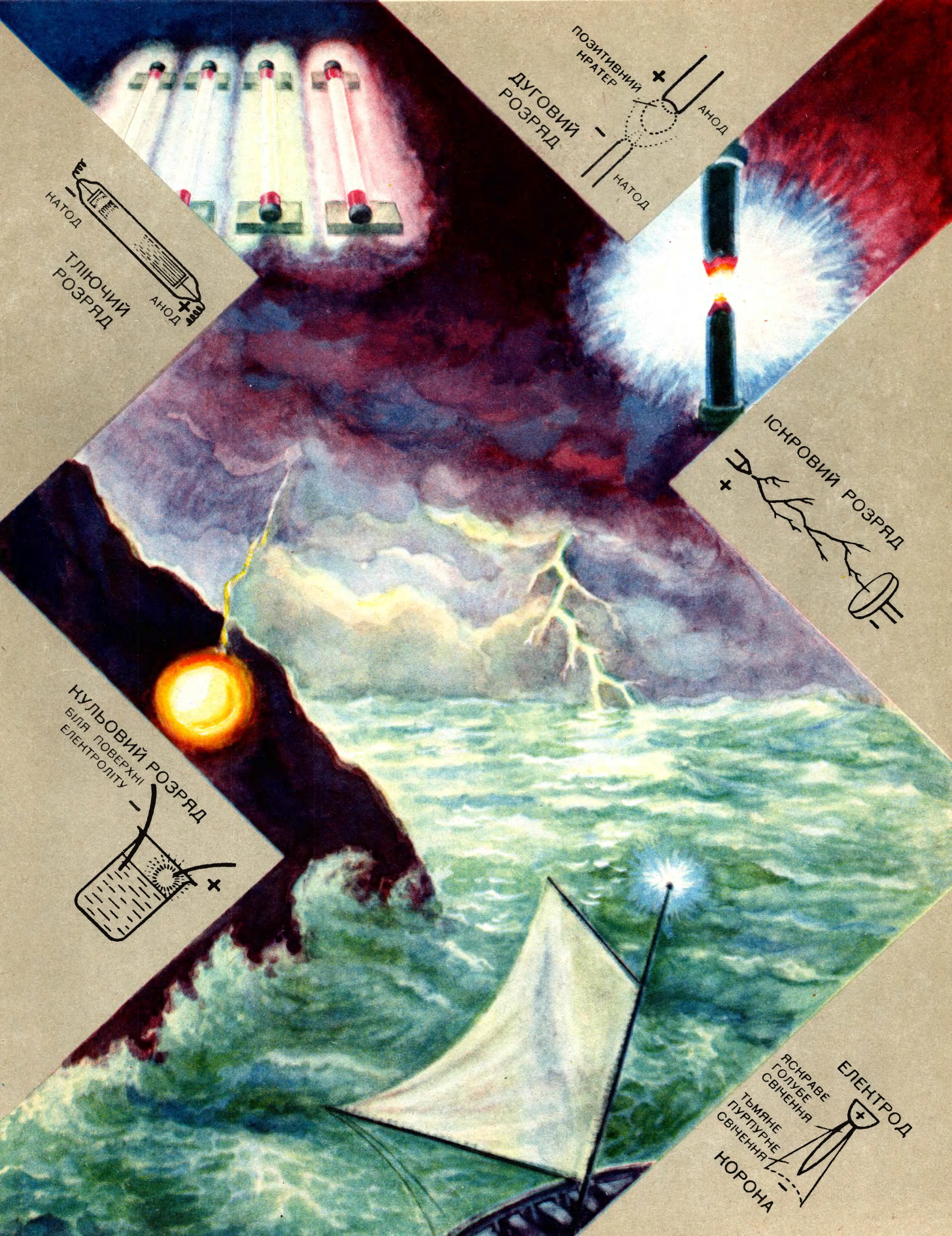
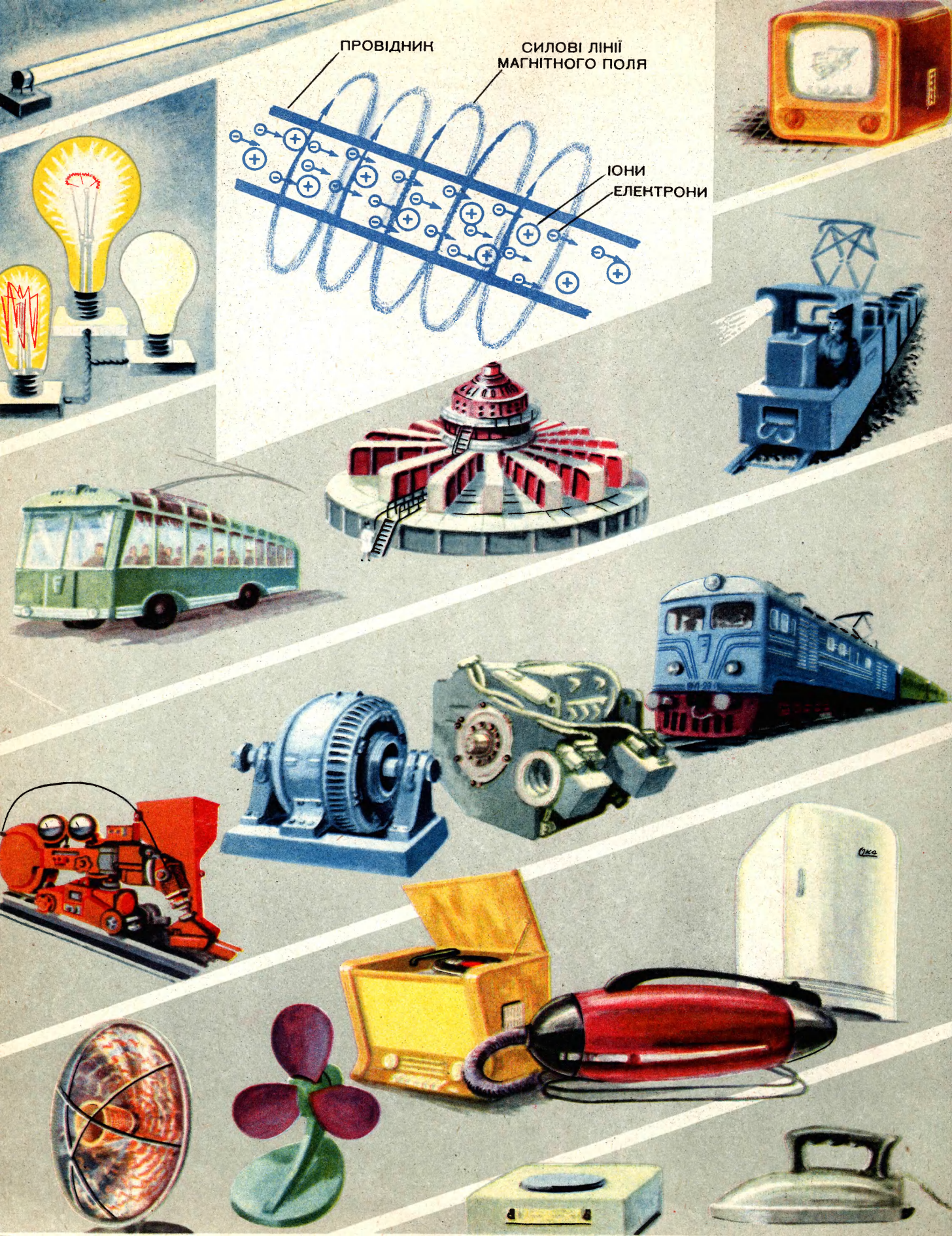


Рис. 6. Картини розподілу силових ліній електричного поля: а) заряджена куля; б) різнойменно заряджені кулі; в) однойменно заряджені кулі; г) конденсатор.

Таблиця 21. Різні види електричних розрядів. Угорі зліва показано тліючий розряд у трубках, укритих світною речовиною; угорі справа — дуговий розряд; в центрі — велетенський іскровий розряд — блискавка; трохи вліво — кулясга блискавка; внизу — коронний розряд, що виникає на верхівці щогли.


ДУГОВИЙ РОЗРЯД
ПОЗИТИВНИЙ КРАТЕР
АНОД
НАТОД
ТЛІЮЧИЙ РОЗРЯД
НАТОД
АНОД
ІСКРОВИЙ РОЗРЯД
КУЛЬОВИЙ РОЗРЯД
БІЛЯ ПОВЕРХНІ ЕЛЕКТРОЛІТУ
ЕЛЕКТРОД
ЯСКРАВЕ ГОЛУБЕ СВІЧЕННЯ
ТЬМЯНЕ ПУРПУРНЕ СВІЧЕННЯ
КОРОНА


ПРОВІДНИК
СИЛОВІ ЛІНІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ
ІОНИ
ЕЛЕКТРОНИ

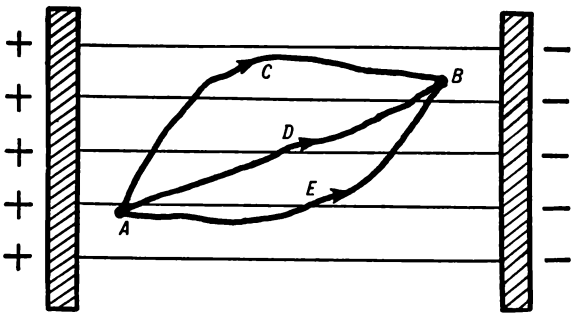


Рис. 7. Робота при переміщенні заряду в постійному електричному полі не залежить від форми шляху.

тричного струму в колі, залежать не від напруженості поля в якійсь одній точці, а саме від різниці потенціалів між двома точками, наприклад, на кінцях провідника у випадку струму. При падінні тіла з деякої висоти для оцінки результатів падіння важливо знати не силу, що діє на тіло в якійсь точці, а роботу, яку виконала сила ваги на шляху падіння. Так само для визначення ефекту, що його може викликати електричне поле, найчастіше треба знати роботу, яку воно може виконати при переміщенні заряду, а не силу, що діє на нього в якійсь точці поля. Правда, знаючи величину поля в кожній точці простору, ми завжди можемо обчислити роботу по переміщенню заряду, але знання різниці потенціалів означає, що ця робота відома.

Ось чому поняття різниці потенціалів (або напруги) міцно ввійшло не тільки в науку й техніку, але й у повсякденне життя. Кожен з вас знає, що напруга в сітці міського струму є головною її характеристикою. Ця напруга визначає струм, що проходить по електричній лампочці або по обмотці трансформатора телевізора, і, отже, ту кількість енергії, яка надходить із сітки.

РЕЧОВИНИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

В електричному відношенні всі тіла поділяються на провідники і ізолятори (діелектрики). І ті і другі в звичайному стані нейтральні. Заряд, наданий ізолятору, не переміщається по ньому, лишаючись у тому місці, куди його вмістили напочатку. А в провіднику заряди можуть вільно переміщатися під впливом електричного поля. (Останнім часом великого значення набули так звані напівпровідники, але про них ми будемо говорити в спеціальній статті).

Така відмінність у властивостях зумовлена особливостями будови провідників і діелектриків. Діелектрики складаються з окремих нейтральних атомів або молекул. Провідники (до них належать усі метали) побудовані інакше. Атоми металу, утворюючи кристалічну решітку, втрачають «зовнішні», більш віддалені від ядра і, отже, слабо з ним зв'язані електрони. Ці електрони перестають належати певним атомам і стають «власністю» всього куска металу в цілому. Такі електрони називають «вільними», бо вони можуть переміщатися всередині металу. Атоми, які втратили частину електронів і утворюють кістяк кристалічних грат, називають іонами.

Розглянемо, наприклад, метал літій. Атом літію має позитивно заряджене ядро, навколо якого роблять складні рухи три електрони. Коли літій у твердому стані, то два електрони кожного атома обертаються навколо ядра, а третій електрон, відірвавшись від атома, може переміщатися всередині металу. Наявність вільних електронів і зумовлює всі особливості металів: здатність добре проводити електричний струм, велику теплопровідність і т. д.

Простий дослід дає змогу встановити, як при відсутності електричного струму розподіляється по провіднику наданий йому заряд. Для цього досить прикріпити до зарядженої дротяної сітки, скрученої у вигляді циліндра, тонкі смужки станіолю. Смужки, розміщені на внутрішній поверхні сітки, залишаться нерухомими, а прикріплені до зовнішньої поверхні — відхиляться від неї (рис. 8). Отже, електричний заряд є тільки на зовнішній поверхні сітки і заряджає тільки зовнішні смужки. Це і спричиняє їх відхилення на деякий кут. На внутрішній поверхні сітки, очевидно, зарядів немає. Цей факт є абсолютно загальним. Електричний заряд розміщається на зовнішній поверхні провідника. Дістати заряд на внутрішній поверхні провідника при відсутності струму в ньому не можна. Причину цього зрозуміти неважко. Однойменні заряди, відштовхуючись і намагаючись якнайдалі ві-

Таблиця 22. Різні види електричних машин і приладів. В середині верхньої частини рисунка схема магнітного поля, що виникає навколо провідника, по якому йде електричний струм.

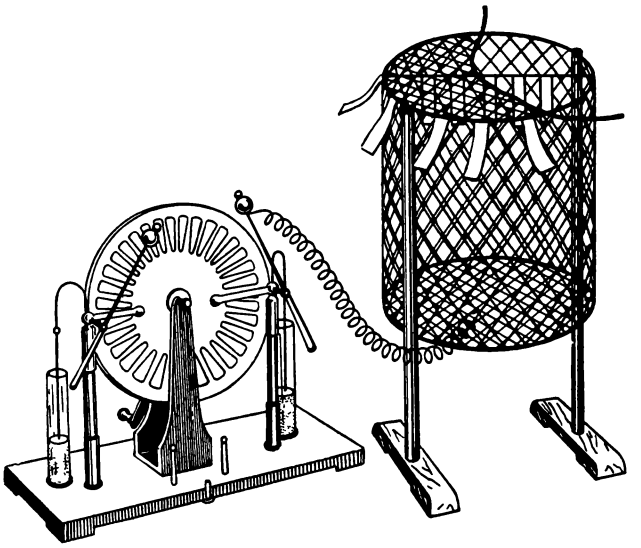


Рис. 8. Електричний варяд розподіляється по поверхні провідника.

дійти один від одного, розміщуються на зовнішній поверхні провідника.

Це правило справедливе незалежно від того, яка причина викликає появу заряду. Якщо вмістити металеве тіло в постійне (що не змінюється з часом) електричне поле, то на його поверхні виникають так звані індукційні заряди, але всередині провідника заряд, як і раніше, дорівнює нулю. При цьому і саме електричне поле не проникає всередину провідника. Тільки в перший момент, коли вноситься провідник у поле, воно проникає всередину металу і викликає переміщення електронів назустріч полю. Ліва частина тіла (рис. 9) заряджається при цьому негативно, а права — позитивно. Заряди переміщатимуться доти, поки не встановиться рівновага. Тоді струм припиниться. Відбувається це надзвичайно швидко. Якщо руху зарядів у провіднику немає, то, значить, у ньому немає і електричного поля, інакше вільні електрони почали б рухатися.

Водночас можна помітити, що силові лінії електричного поля, обриваючись на поверхні металу, завжди перпендикулярні до неї. Поле вздовж поверхні дорівнює нулю, бо струмів на поверхні теж немає.

Непроникність металів для постійного електричного поля широко використовується для так званого електростатичного захисту. Щоб захистити чутливі електричні прилади від впливу зовнішніх випадкових електричних полів, їх вміщують у металеві ящики.

Коли провідник має форму кулі, то заряди на ньому розміщуються рівномірно по всій поверхні. А коли на ньому є гострі виступи, то заряди скупчуються переважно на вістрях. Велика напруженість поля, яка при цьому виникає, може викликати ряд цікавих явищ. Провідник починає розряджатися. Заряди «стікають» з вістря, викликаючи помітне переміщення повітря — «електричний вітер». Цей вітер може загасити полум'я свічки на відстані кількох сантиметрів від вістря.

Явище «стікання» електрики використовується у блискавковідводах — заземлених металевих стержнях, високо піднятих над навколишніми будинками. Тільки під час дуже сильної грози блискавка б'є у блискавковідвід, але при цьому електричний заряд не завдає шкоди — іде в землю.

Розглянемо тепер, як впливає на взаємодію заряджених тіл діелектрик. Для цього спочатку крутильними терезами вимірюємо силу взаємодії між різнойменно зарядженими кульками A і B. Потім заповнимо скляну посудину терезів яким-небудь рідким діелектриком, наприклад, гасом. Ніяких помітних на око змін з діелектриком не станеться. Проте електричне поле, що існує між кульками, виконує в ньому роботу. Про цю роботу можна судити за результатами. Відстань між кульками збільшується, що свідчить про зменшення сили притягання. Вимірювання покаже, що в гасі сила взаємодії кульок у два рази менша, ніж у повітрі.

Чому це так? Поле проникає всередину електрично нейтральних молекул гасу. Позитивні заряди молекул зміщуються вздовж поля, а негативні — проти поля. Через те що ці заряди з в'я з а н і один з одним значними силами, то молекули не розриваються, вони тільки розтягуються вздовж силових ліній, перетворюючись у системи, які можна розглядати як електричні д и п о л і.

Картина, яка при цьому виникає, схема-

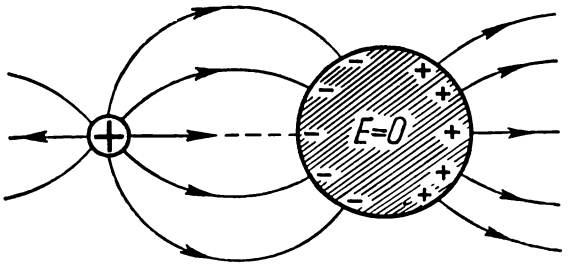


Рис. 9. Металева куля в постійному електричному полі.

тично зображена на рис. 10. Подивіться, як безперервні ланцюжки диполів витягуються між зарядами! Діелектрик, що перебуває в такому стані, називають поляризованим. Особливо істотно, що негативно заряджені кінці диполів суцільним покривом охоплюють позитивний заряд, а позитивні кінці диполів — негативний. Позитивні і негативні кінці диполів у гасі стикаються один з одним, і їх електрична дія нейтралізується. Але на поверхні кульок такої компенсації не відбувається. Легко уявити, до чого це приводить. Тепер поле створюють не тільки самі кульки, але й «зв'язані» заряди кінців диполів. Поле в діелектрику, створене однією з кульок, наприклад, *A*, слабшає, бо заряд кульки *A* і «зв'язаний» заряд на її поверхні мають різні знаки і створюють поля протилежного напряму. Ясно, що зменшується і сила, яка діє на другу кульку *(B)*.

Число, яке показує, у скільки разів зменшується в даному діелектрику поле, створене зарядом, називається діелектричною проникністю даної речовини. Діелектрична проникність характеризує електричні властивості діелектрика. Різні діелектрики мають різні значення діелектричної проникності. Так, діелектрична проникність повітря близька до одиниці (1,00059), а води — приблизно у 80 раз більша. У деяких діелектриків, як наприклад, сегнетова сіль, діелектрична проникність дуже велика, близько 10 000. Такі речовини називають сегнетоелектриками. Їх використовують як важливий матеріал при виготовленні високоефективних електричних конденсаторів. Відзначимо ще, що молекули ряду діелектриків, наприклад, води, і при відсутності електричного поля являють собою диполі. Поляризація таких діелектриків полягає в звичайному повороті всіх диполів уздовж електричного поля.

При вміщенні в електричне поле поляризація діелектрика звичайно не супроводиться зміною його розмірів. Проте у деяких кристалічних речовин справа стоїть інакше. У сегнетової солі, кварцу та ін. поляризація супроводиться механічними деформаціями: стисканням або розтяганням. І навпаки, якщо піддавати ці тіла деформаціям, то вони поляризуються і на їх поверхні виступають «зв'язані» електричні заряди. Це явище називається п'єзоелектричним ефектом. П'єзоелектричний ефект широко використовується в практиці. Деформацію кварцу в змінному електричному полі використовують для здобування ультразвуку (див. статтю «Звук і ультразвук»).

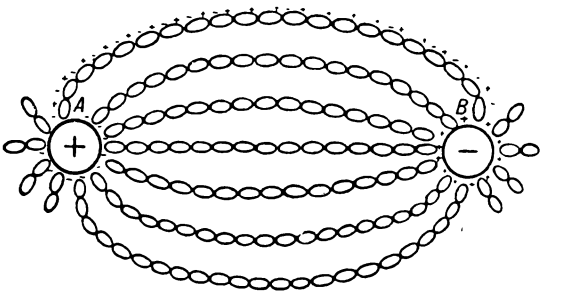


Рис. 10. В електричному полі молекули діелектрика розтягуються і розміщуються вздовж силових ліній.

Поляризація діелектрика під впливом деформації використовується для перетворення механічних впливів у електричні. На цьому принципі побудований п'єзоелектричний звукознімач електричного програвача. Коливання голки під час руху по звуковій доріжці деформують маленький кристал і викликають його поляризацію. Зв'язані заряди, що виступають на поверхні кристала, створюють змінні електричні поля, які збуджують слабкі електричні струми в провідниках звукознімача, що підходять до кристала. Ці струми підсилюють і подають у репродуктор.

На цьому ж принципі грунтуються точні методи вимірювання тисків.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У МЕТАЛАХ

Електричним струмом називають рух будь-яких електричних зарядів. Переміщення зарядів у будь-якій речовині завжди натрапляє на опір і потребує виконання роботи. Тому, щоб у замкненому колі виник електричний струм, необхідно насамперед джерело, за рахунок енергії якого виконувалася б робота по переміщенню зарядів. Таким джерелом, наприклад, може бути гальванічний елемент, акумулятор, генератор електричного струму. Що електричні заряди проходять, можна судити тільки по тих явищах, які супроводять електричний струм. Так, якщо пропускати електричний струм по дротині, вона розжарюється. Коли струм проходить через розчини, на електродах виділяється речовина. Нарешті, що дуже важливо, коли електричний струм проходить по провіднику, навколо нього завжди виникає магнітне поле, яке можна виявити по відхиленню магнітної стрілки, розміщеної коло провідника.

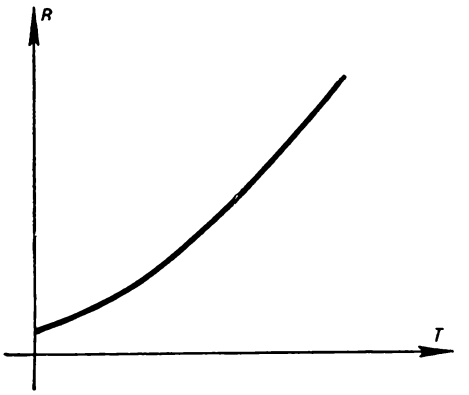


Рис. 11. Залежність електричного опору (R) від температури (T) для металів, що не переходять у надпровідний стан.

Починаючи вивчення електричного струму в металах, з'ясуємо насамперед питання, за якою фізичною ознакою можна відрізнити метал від неметалу. Такою ознакою може бути залежність електричного опору речовини від температури. Поставимо дослід. Увімкнемо в електричне коло дротяний опір і будемо вимірювати струм в електричному колі. Зауважимо, що при нагріванні дроту величина струму в електричному колі зменшується, а при охолодженні — збільшується. З цього досліду можна зробити висновок, що опір металевого дроту зростає при збільшенні температури (рис. 11).

Що ж відбувається в металі, коли по ньому проходить електричний струм, і чому електричний опір металу зростає з підвищенням температури? Тепловий рух у металах істотно відрізняється від теплового руху в газі. Іони, що утворюють кістяк кристалічної решітки, не можуть переміщатися по металу подібно до вільних електронів. Вони тільки коливаються біля деяких середніх положень, що називаються вузлами кристалічної решітки. Цей рух нагадує рух кульки на пружинках (рис. 12).

При нагріванні металу розмах коливань іонів біля вузлів кристалічної решітки збільшується. Чим вища температура, тим більша амплітуда коливань, а отже, і енергія коливального руху іонів.

Коли приєднати металевий провідник до джерела струму, всередині провідника виникає електричне поле. При цьому на заряджені частинки діятиме сила, що дорівнює добуткові електричного заряду на напруженість електричного поля.

Під впливом цієї сили вільні електрони переміщатимуться по металу. Їх рух і створює електричний струм.

Яка ж роль іонів при проходженні електричного струму через метал? Електрони під впливом електричного поля рухаються з прискоренням. Це значить, що швидкість вільних електронів, а отже, і їх кінетична енергія зростають. У своєму русі електрони стикаються з іонами кристалічної решітки, передаючи їм при цьому частину своєї кінетичної енергії. В результаті вздовж металу встановлюється рух вільних електронів з деякою постійною середньою швидкістю — по металевому провіднику проходить постійний струм. Таким чином, набувана в проміжках між зіткненнями внаслідок прискореного руху під впливом поля кінетична енергія передається від вільних електронів іонам кристалічної решітки. Іони перешкоджають рухові вільних електронів. Цим зумовлений електричний опір металів. Він зростає при підвищенні температури внаслідок збільшення частоти зіткнень електронів з іонами решітки.

Напруженість електричного поля в металі зростає при збільшенні різниці потенціалів. Зв'язок між величиною струму, різницею потенціалів і електричним опором встановлюється практично і визначається законом Ома. Згідно з цим законом, струм на ділянці провідника прямо пропорціональний різниці потенціалів на кінцях ділянки і обернено пропорціональний його електричному опору.

Змальована вище картина руху електронів у металі, коли через нього проходить електричний струм, дає можливість зрозуміти суть закону Ома. Справді, чим більша на кінцях даного металевого зразка (наприклад, дротини) різниця потенціалів, тим більша напруженість електричного поля, тим більша буде сила, що діє на вільні електрони, тим більша швидкість їх руху. Тому при збільшенні різниці потенціалів струм зростає.

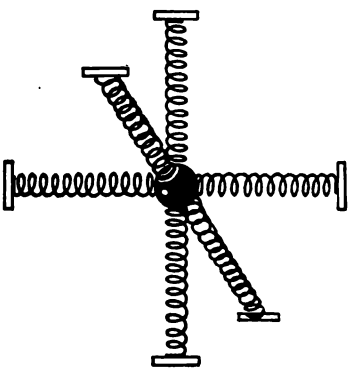


Рис. 12. Рух іонів у металі схожий на рух кульки, закріпленої на пружинках.

Нехай тепер різниця потенціалів буде стала, і ми вмикаємо в електричне коло одна-

кового розміру дротинки, зроблені з різних металів. Тепер струм буде більший у тому зразку металу, в якому взаємодія електронів з іонами слабша і іони менше перешкоджають рухові електронів. При зменшенні опору струм збільшується.

Куди ж переходить енергія, яку передають електрони іонам при їх взаємодії? Як ми вже говорили, іони не можуть вільно переміщатися вздовж металу. Енергія, яка їм передається, іде на збільшення розмаху коливань, на зростання енергії теплового руху. І справді, проходження електричного струму супроводиться нагріванням металу. Зв'язок між кількістю виділеної теплоти, величиною струму і опором виражається законом Джоуля — Ленца. Проте не завжди струм через метали проходить так, як це описано вище.

Ще в 1911 р. голландський фізик Камерлінг-Оннес відкрив дивне явище, яке називають **надпровідністю**. Він вивчав проходження електричного струму через ртуть при низьких температурах. Виявилось, що електричний опір ртуті при температурі 4°,12 за абсолютною шкалою температур спадає до нуля (рис. 13). Тепер відомі 23 чистих метали, що мають властивість надпровідності. Цю властивість мають також дуже багато сполук і сплавів. В таблиці подано температуру переходу в надпровідний стан для деяких провідників.

Речовина	Температура переходу	Речовина	Температура переходу
Ртуть	4,12	Тантал	4,38
Свинець	7,26	Ніобій	9,22
Алюміній	1,14	Карбід ніобію	10,1
Цинк	0,79	Нітрид ніобію	23,0

Надпровідники мають також дивні магнітні властивості. В 1933 р. німецький учений Мейснер виявив, що при переході в надпровідний стан магнітне поле цілком виштовхується з об'єму надпровідника і концентрується у вузькому поверхневому шарі (порядку 10^{-5} *см*). Таким чином, магнітне поле не проникає всередину речовини, що перебуває в надпровідному стані. Магнітні силові лінії ніби обтікають надпровідник, не проникаючи в нього.

Більше сорока років не могли пояснити ці дивні явища. У вивченні явища надпровідності велику роль відіграли праці Лондона, Піппарда, Л. Д. Ландау, А. І. Шальникова і багатьох інших учених.

Тільки в 1957 р. було створено теорію надпровідності. Згідно з цією теорією, стан теплового руху в металі, що перебуває в стані надпровідності, істотно відрізняється від стану теплового руху в звичайному (ненадпровідному) стані металу. Механізм електропровідності надпровідників інший, ніж описаний вище механізм провідності звичайних металів. Електрони в даному разі утворюють з коливними іонами зв'язану систему.

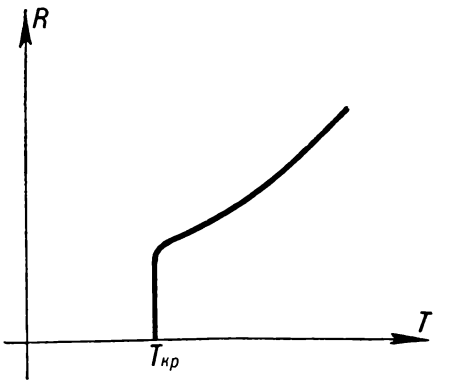


Рис. 13. Електричний опір ртуті при температурі $T_{кр} = 4°,12$ вникає, ртуть переходить у надпровідний стан.

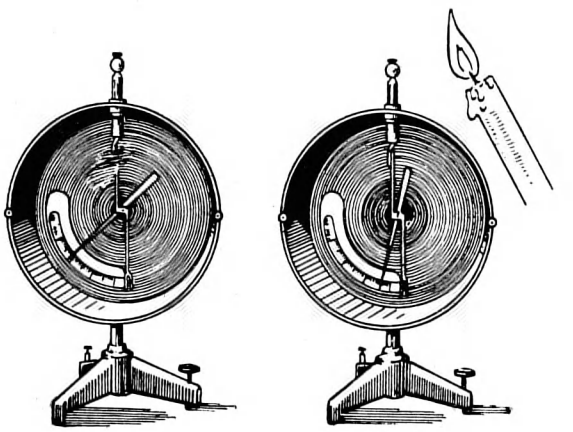
Основу сучасної теорії надпровідності розробили в своїх працях англійський фізик Г. Фреліх, американські фізики Бардін, Купер, Шріффер. Істотним вкладом в теорію цього явища є новий метод в теорії надпровідності і надтекучості, розроблений радянським ученим акад. М. М. Боголюбовим у 1958 р. За роботи в галузі теорії надтекучості і надпровідності акад. М. М. Боголюбов був удостоєний Ленінської премії.

Залежність опору металу від температури використовують у так званих термометрах опору. Температуру в даному разі визначають за величиною опору металевої дротини. Такі термометри встановлено, наприклад, на баштах Московського університету на Ленінських горах. Позитивна якість термометрів опору полягає, зокрема, в тому, що їх можна використовувати як при високих, так і при дуже низьких температурах.

Особливі властивості надпровідників відкривають широкі можливості для різного їх застосування.

ПРОХОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ ЧЕРЕЗ ГАЗИ

У звичайних умовах гази, в тому числі й повітря, не є провідниками. У цьому легко переконатися, спостерігаючи за положенням



а *б*

Рис. 14: а) при відсутності іонізатора заряд електрометра довгий час вберігається; б) якщо до електрометра піднести свічку, то відбувається іонізація повітря, воно стає провідником електрики, і електрометр починає розряджатися.

стрілки зарядженого електрометра. Якщо в приміщенні, де знаходиться електрометр, повітря сухе, то заряд електрометра довгий час лишається незмінним (рис. 14,*а*). Проте повітря можна зробити провідником. Для цього треба його піддати одній з таких дій: нагріти, наприклад, наблизивши свічку або пальник до електрометра (рис. 14, *б*), опромінити ультрафіолетовим або рентгеновим промінням, піддати діянню радіоактивного випромінювання і т. п. При всіх цих діях, якщо, звичайно, вони досить інтенсивні, електрометр швидко розряджається. Це значить, що газ, коли на нього так діяти, стає провідником електрики.

Чому ж змінюються електричні властивості газу, коли на нього діяти таким чином?

У звичайних умовах гази складаються з нейтральних атомів або молекул. Під впливом високої температури і різних випромінювань з частини нейтральних атомів вириваються електрони. В результаті утворюються позитивно заряджені іони і вільні електрони. Можуть утворюватися також і негативні іони[1]. Поява в газі заряджених частинок і робить його провідником електрики.

Процес утворення іонів і електронів у газах називається іонізацією. Усі перелічені вище фактори, що викликають появу іонів, називаються іонізаторами. Якщо іонізатор перестає діяти, то заряджений електрометр знову зберігатиме заряд, тобто газ перестає бути провідником. Відбувається це внаслідок того, що іони і електрони, перебуваючи в безперервному тепловому русі і стикаючись один з одним, знову утворюють нейтральні атоми і молекули. Цей процес називається рекомбінацією (возз'єднанням) іонів.

Візьмемо наповнену розрідженим газом скляну трубку з двома металевими електродами. Увімкнемо її в електричне коло. Наблизимо який-небудь іонізатор, від якого в газі утворюється певна кількість пар іонів протилежних знаків (позитивно заряджений іон і електрон, позитивно заряджений іон і негативно заряджений іон). Якщо різниця потенціалів на електродах трубки дорівнює нулю, то встановиться динамічна рівновага, при якій число новоутворених пар іонів дорівнюватиме числу пар іонів, що зникають внаслідок рекомбінації.

Якщо до електродів прикласти невелику різницю потенціалів, то позитивно заряджені іони почнуть переміщатися до негативного електрода, а негативно заряджені — до позитивного. Внаслідок цього в трубці, наповненій газом, виникає електричний струм. Проходження електричного струму через газ називається газовим розрядом. При цьому тільки частина пар іонів, що утворюються під впливом іонізатора, рекомбінуватиме в об'ємі газу, а всі інші нейтралізуватимуться на електродах. Збільшуючи різницю потенціалів, досягнемо того, що практично всі іони нейтралізуються біля електродів. При такому значенні різниці потенціалів струм, здавалось би, повинен досягти максимального значення і при дальшому збільшенні різниці потенціалів лишатися незмінним (рис. 15).

Проте дослід показує, що при дальшому збільшенні різниці потенціалів, починаючи з деякого значення, яке називається потенціа-

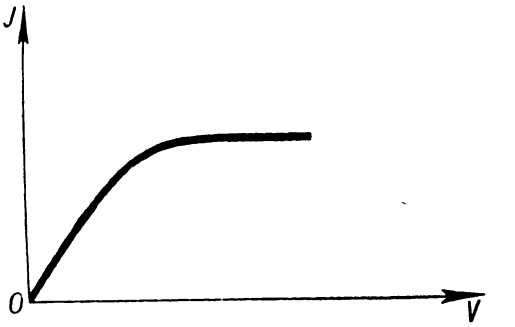


Рис. 15.

[1] У тому, наприклад, випадку, коли до нейтрального атома або молекули приєднується електрон.

лом запалювання ($V_з$), струм знову зростає (рис. 16). Це значить, що в газі появляються додаткові іони, крім тих, які утворює іонізатор. Кількість нових іонів повинна бути дуже велика, бо струм може збільшуватись у сотні й тисячі раз. Розряд при цьому починає світитися. Якщо тепер вимкнути іонізатор, то розряд не припиняється. Це значить, що іони тепер можуть утворюватися в газі без зовнішнього іонізатора в результаті процесів, що відбуваються в самому розряді. Газовий розряд, який уже не потребує зовнішнього іонізатора для свого підтримання, називається самостійним розрядом. Напруга, при якій виникає самостійний розряд, називається напругою запалювання.

Як пояснити різке збільшення струму в розряді при потенціалах, що перевищують потенціал запалювання? Розглянемо яку-небудь пару іонів (позитивний іон і електрон), утворену зовнішнім іонізатором. Вільний електрон, що виник таким чином, починає рухатися до позитивного електрода. В своєму русі він натрапляє на іони і нейтральні атоми. В проміжках між двома послідовними зіткненнями його енергія збільшується за рахунок прикладеної різниці потенціалів. Зіткнувшись з іоном або атомом, електрон передає їм частину своєї енергії. Якщо різниця потенціалів досить велика, то кінетична енергія електрона стає настільки великою, що, зустрівшись з нейтральним атомом, він може іонізувати його. Утворені таким чином два електрони в свою чергу будуть прискорюватися і іонізувати зустрічні атоми. Таким чином, коли потенціали перевищують потенціал запалювання, кількість іонів у газі швидко збільшується, і вже не за рахунок зовнішнього іонізатора, а в результаті процесів, що відбуваються в самому розряді.

Можливі і інші способи утворення іонів у газі, які теж приводять до розвитку самостійного розряду. Залежно від характеру самостійного розряду і способу утворення в ньому іонів розрізняють тліючий, дуговий, іскровий, коронний та інші розряди.

Тліючий розряд звичайно буває при тисках у кілька десятків міліметрів ртутного стовпа і нижчих. Проте в спеціальних умовах удається здобути тліючий розряд і при вищих тисках. У тліючому розряді позитивні іони, які утворюються електронними ударами в газі, під час свого руху до катода набувають великої енергії. При ударах таких швидких іонів об катод відбувається вибивання електронів з металу (вторинна електронна емісія). Ці два процеси (іонізація електронним ударом і вторинна електронна емісія на катоді) і є основними в тліючому розряді.

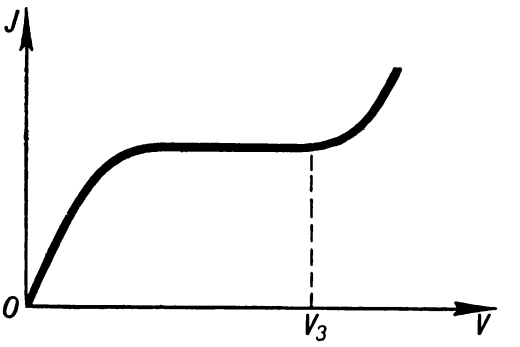


Рис. 16.

Розглянемо деякі випадки застосування тліючого розряду. Тліючий розряд використовують у ряді приладів: у випрямлячах тліючого розряду, що перетворюють змінний струм у постійний, у тліючих стабілізаторах напруги — стабіловольтах, що підтримують сталу електричну напругу. Тліючий розряд виникає, коли засвічуються сигнальні неонові лампочки, в лампах денного світла і в рекламних трубках. Так, у лампах денного світла тліючий розряд звичайно відбувається в ртутній парі. Випромінювання ртутної пари, яке, в основному, припадає на фіолетову і ультрафіолетову частини спектра, вбирається шаром спеціальної речовини (люмінофору), нанесеної на поверхню трубки. Ці речовини підбирають так, щоб вони, вбираючи фіолетове і ультрафіолетове проміння, випромінювали б світло, близьке складом до сонячного.

У трубках, що застосовуються для реклам, звичайно використовують тліючий розряд у неоні (червоне світіння) і в аргоні (синювато-зелене світіння).

Велике практичне значення має інша форма самостійного розряду — дуговий розряд, уперше здійснений російським акад. В. В. Петровим у 1802 р. Дуговий розряд можна дістати, якщо збільшити в тліючому розряді величину струму і зменшити зовнішній опір.

Найпростіше дуговий розряд утворюється, якщо розсунути вугільні електроди. При цьому внаслідок збільшення опору між електродами різко збільшується температура, повітря іонізується і починається розряд. Температура кратера дуги (заглибини, що утворюється на позитивному електроді) при атмосферному тиску

досягає 4000°С, а при тиску 20 *атм* перевищує 7000°С. Щоб уявити собі, яка висока ця температура, можна порівняти її з температурою поверхні Сонця — фотосфери, — яка приблизно дорівнює 6000°С.

Велика електропровідність газу в дуговому розряді забезпечується великою кількістю електронів, що вилітають з катода. Вилітання великої кількості електронів з катода зумовлене його високою температурою. При цьому відбувається процес термоелектронної емісії[1]. Електрична дуга є потужним джерелом світла і використовується в прожекторах, проекційних і кіноапаратах. Тепер як джерела світла використовують дугові лампи, в яких дуговий розряд відбувається при високому тиску.

Дуговий розряд використовують для зварювання і різання металів. В металургії широко користуються електропечами, в яких джерелом тепла є електрична дуга.

Дуговий розряд низького тиску з ртутним катодом у ртутній парі використовують у ртутних випрямлячах змінного струму. Відмітна риса ртутних випрямлячів — малий внутрішній опір. Ними користуються для випрямляння змінних струмів значної величини (сотні амперів). Ртутний дуговий розряд використовують у медицині як джерело ультрафіолетових променів.

Дуже цікавий іскровий розряд. Зовнішнім виглядом іскровий розряд схожий на пучок яскравих зигзагоподібних смужок, що розгалужуються від тонкого каналу. Вони швидко пронизують розрядний проміжок, гаснуть, потім виникають знову. Для виникнення електричної іскри необхідно, щоб напруженість електричного поля в газі перевищувала деяке критичне значення. Для повітря при атмосферному тиску воно дорівнює приблизно 30000 *в/см*; коли тиск зростає, його величина збільшується.

Прикладом велетенського іскрового розряду є блискавка. Блискавки виникають або між хмарами, або між хмарою і землею. Величина струму в блискавці досягає півмільйона амперів, а напруга між хмарою і Землею — мільярда вольтів. Окремі розряди блискавки дуже короткочасні, всього тільки близько однієї мільйонної частини секунди.

При утворенні іскрового розряду поряд з утворенням іонів при зіткненнях істотну роль відіграє також іонізація за рахунок випромінювання самої іскри, температура газу в каналі якої може перевищувати 100 000°С. Ступінь іонізації в каналі іскри близький до 100%.

Відзначимо ще дуже гарне і своєрідне явище — кулясту блискавку — яскраве світле утворення, яке порівняно повільно переміщується в повітрі. Розміри кулястих блискавок можуть бути різні. Найчастіше спостерігаються блискавки діаметром 10—20 *см*, але іноді вони досягають десятків метрів у діаметрі. Тривалість існування кулястої блискавки різна: від частин секунди до кількох хвилин. Зникає вона раптово, вибухаючи і завдаючи при цьому іноді значних руйнувань. Спроби розгадати природу кулястої блискавки і здобути її в лабораторії поки що не мали великого успіху.

Спостереження показують, що на земній кулі за добу відбувається понад сорок тисяч гроз, а середнє число ударів блискавок на секунду становить близько двох тисяч. Для захисту різних споруд від руйнування при ударах блискавки застосовують блискавковідводи.

На верхів'ях дерев, корабельних щогл та інших виступаючих предметах іноді з'являється світіння. За стародавніх часів воно викликало у мореплавців марновірний жах. Його називали «вогнями святого Ельма». Це світіння являє собою одну з різновидностей коронного розряду. Експериментально коронний розряд добувають на електродах з тонкого дроту або з загостреними виступаючими частинами. Біля виступаючих частин напруженість поля може досягати дуже великих значень. Якщо вона перевищує критичне значення (близько 30 000 *в/см* при атмосферному тиску), то повітря поблизу електрода іонізується і відбувається розряд. Світна область розряду, зосереджена біля виступаючих частин, в деяких випадках нагадує корону.

Коронний розряд може виникнути на виступаючих частинах або в проводах ліній високої напруги, що призводить до значних втрат електроенергії. Зменшують можливість виникнення коронного розряду, збільшуючи діаметр проводів.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У РІДИНАХ

Рідини, як і тверді тіла, можуть бути і діелектриками, і провідниками. До рідких діелектриків належать, наприклад, дистильована вода, гас, різні масла. Провідні рідини розрізняють за механізмом перенесення елек-

[1] Термоелектронна емісія — випромінювання електронів дуже нагрітим тілом.

тричних розрядів. Так, наприклад, у ртуті і розплавлених металах (мідь, срібло і т. д.) перенесення зарядів здійснюється, як і у твердих металах, вільними електронами.

Проте існує дуже велика кількість рідин із зовсім іншим механізмом електропровідності. До таких рідин належать розчини солей, кислот, лугів, розплавлені солі — це так звані електроліти. У чому ж їх особливості і як відбувається в них перенесення електричного заряду? Візьмемо розчин кухонної солі NaCl у воді. Частина молекул у ньому розпадається на позитивно і негативно заряджені іони Na^+, Cl^-. Такий розпад молекул у розчині на іони називається електролітичною дисоціацією. Ступінь дисоціації, тобто доля молекул розчиненої речовини, які розпадаються на іони, залежить від температури, концентрації розчину і природи розчинника. Іони різних знаків, зустрічаючись, можуть знову з'єднуватись у нейтральні молекули. В заданих умовах у розчині встановлюється динамічна рівновага, при якій число молекул, що розпадаються на іони за одиницю часу, дорівнює числу пар іонів, які за одиницю часу знову з'єднуються в нейтральні молекули.

Якщо увімкнути посудину з електролітом в електричне коло, то негативні іони почнуть рухатися у напрямі до позитивного електрода, а позитивні — до негативного. Виникне електричний струм. При цьому відбудеться електроліз — виділення на електродах речовин, що входять до складу електроліту.

Електроліз широко застосовують у техніці. Щоб покрити, наприклад, деталі велосипеда тонким шаром нікелю або хрому і вберегти його від ржавіння, їх вміщують у розчин солей цих металів як катод. Анод роблять з металу, яким хочуть покрити деталь. Якщо пропускати струм через розчин, то металевий анод розчинятиметься, а на катоді виділятиметься метал у вигляді тонкої плівки. Такий спосіб покриття називають гальваностегією. Електролізом користуються також для одержання металевих відбитків з рельєфних предметів (медалей, монет, барельєфів і т. д.). Для цього спочатку роблять на дошці або на стеарині відбиток предмета. Потім, щоб зробити відбиток електропровідним, його вкривають графітом. Після цього його вміщують у розчин як катод і осаджують на ньому той чи інший метал (рис. 17). Таким чином одержують металеву копію предмета.

За допомогою електролізу добувають алюміній. Електролізом користуються для добування чистих металів (рафінування міді).

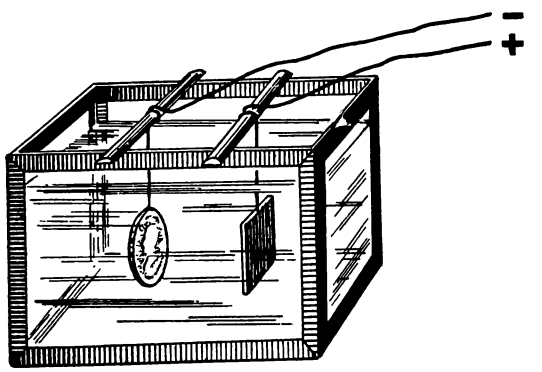


Рис. 17. Гальванічна ванна.

МАГНІТНЕ ПОЛЕ

Поставимо такий дослід. У скляну трубку (рис. 18) помістимо два сильних магніти однойменними полюсами назустріч один одному. Бачимо, що магніти відштовхуються, і верхній магніт висить над нижнім, не торкаючись його. Упасти верхньому магніту не дає якась особлива форма матеріального середовища, через яке передається взаємодія магнітів. Це середовище називають магнітним полем.

Для визначення характеру магнітного поля навколо магніту тієї чи іншої форми візьмемо відповідний магніт і невелику магнітну стрілку, підвішену на нитці або зрівноважену на вістрі. Будемо спостерігати за магнітною стрілкою, розміщаючи її в різних точках навколо магніту. У кожній точці стрілка повертатиметься в певному напрямі.

Датський фізик Г. Х. Ерстед на початку XIX ст. помітив, що аналогічно поводиться магнітна стрілка, якщо її вмістити близько від провідника, по якому проходить електричний струм (рис. 19).

Виявилося, що для того, щоб знайти і дослідити магнітне поле струму, не обов'язково брати магнітну стрілку. Магнітне поле можна виявити і дослідити, користуючись іншим провідником з струмом. Це важливе відкриття зробив французький фізик А. Ампер на початку XIX ст. Відтворимо дослід Ампера. З тонкого ізольованого дроту зробимо котушку,

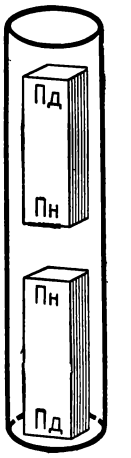


Рис. 18.

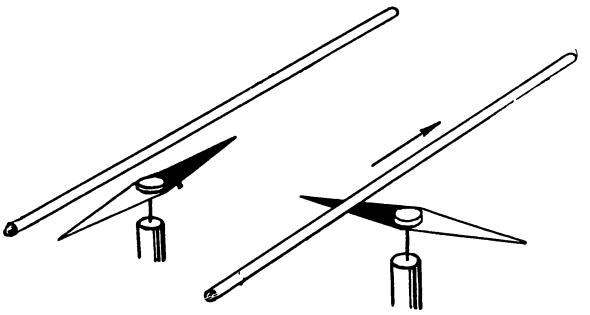


Рис. 19. Якщо магнітну стрілку наблизити до провідника з струмом, то вона орієнтується в певному напрямі.

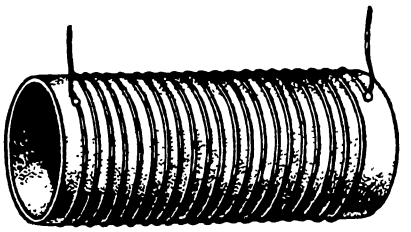


Рис. 20. Соленоїд.

як показано на рис. 20. Таку котушку називають соленоїдом. Увімкнемо цю котушку в електричне коло і будемо її ставити в різних точках біля провідника з струмом. Ми помітимо, що соленоїд поводиться подібно до магнітної стрілки. У кожній точці магнітного поля він повертається в певному напрямі. Якщо взяти дві котушки з струмом, то вони поводитимуться, як два магніти. Кожна з котушок має, як і прямий магніт (рис. 21), два полюси — північний і південний (рис. 22). Різнойменні полюси котушок притягуються, а однойменні — відштовхуються.

Отже, магнітна стрілка або котушка з струмом встановлюються в кожній точці магнітного поля в певному напрямі. Це значить, що коли їх розміщати довільно, то на них діятиме обертаючий момент (момент сил) доти, поки вони не займуть цілком певного для даної точки поля положення.

Як вам уже відомо, кожна точка електричного поля характеризується напруженістю електричного поля. Кожна точка магнітного поля також характеризується певною напруженістю. За напрям напруженості магнітного поля в даній точці беруть напрям, по якому в даній точці поля розміщується магнітна стрілка або котушка з струмом.

Вмістимо по черзі в одну і ту ж точку поля дві котушки, підвішуючи їх на пружній нитці. Розміщатимемо котушки так, щоб напрям їх був перпендикулярним до напряму напруженості магнітного поля в цій точці. При такому розміщенні котушок обертаючі моменти сил будуть максимальними. Через те що котушки підвішені не вільно, а на пружній нитці, то вони не зможуть розміститися вздовж напряму напруженості магнітного поля, а повернуться тільки на невеликі кути. За величиною цих кутів можна визначити обертаючі моменти, які діють на кожну з котушок. Вимірювання показують, що на різні котушки, вміщені в дану точку поля, діють і різні обертаючі моменти. Величина обертаючого момента пропорціональна напруженості в даній точці поля і так званому магнітному моменту котушки, який залежить від струму, числа витків котушки і її поперечного перерізу. Магнітний момент напрямлений уздовж котушки від південного полюса до північного. Магнітна стрілка теж має певний магнітний момент. З усього сказаного ясно, що коли магнітна стрілка або котушка підвішені вільно, то вони повертатимуться доти, поки їх магнітні моменти не збіжаться з напрямом напруженості поля в даній точці.

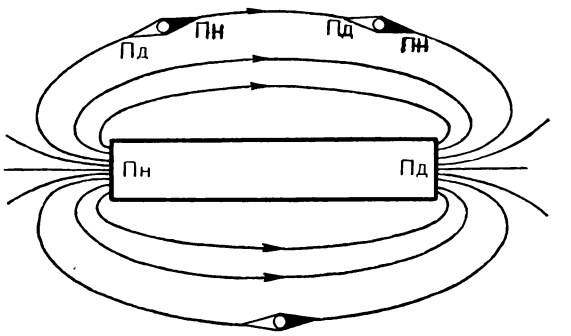


Рис. 21.

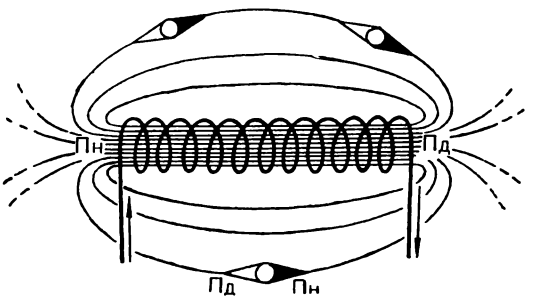


Рис. 22.

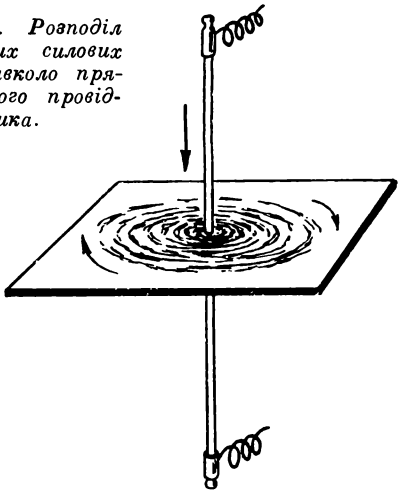


Рис. 23. Розподіл магнітних силових ліній навколо прямолінійного провідника.

Магнітне поле можна дуже наочно зобразити графічно магнітними силовими лініями. Це — лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом напруженості магнітного поля в цих точках.

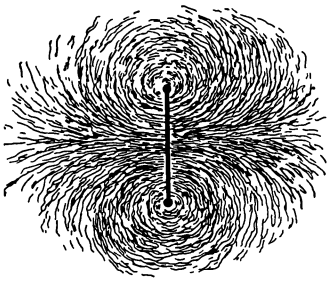


Рис. 24. Розподіл силових ліній магнітного поля колового струму.

Картину розміщення магнітних силових ліній легко спостерігати на досліді. Для цього в різні точки поля вмістимо маленькі магнітні стрілки. В кожній точці вони повернуться в напрямі напруженості магнітного поля, ніби вистроюючись уздовж силових ліній. Як такі маленькі магнітні стрілки можна взяти залізні ошурки. На рис. 23—25 показано такі картини розподілу магнітних силових ліній навколо провідників різної форми. Магнітні силові лінії завжди замкнені. В цьому їх істотна відмінність від електричних.

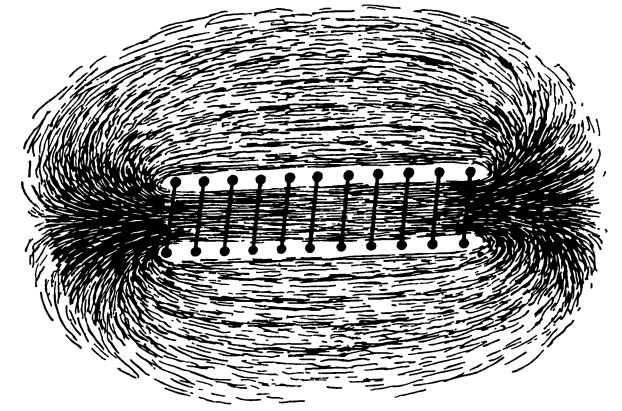


Рис. 25. Силові лінії магнітного поля навколо соленоїда.

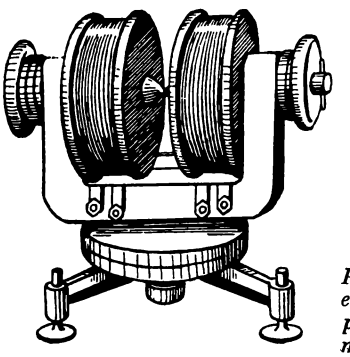
Схожість у поведінці магнітів і котушок із струмом навела Ампера на думку, що і поле магнітів теж створюється струмами.

Дальший розвиток учення про магнітні явища підтвердив правильність гіпотези Ампера. Тепер твердо встановлено, що магнітне поле магнітів створюється внутрішньоатомними струмами. Вони існують у кожному атомі і створюються внаслідок руху електронів у атомах. Більше того, було встановлено, що магнітне поле виникає не тільки під час руху зарядів по провідниках і електронів у атомах, але й при будь-яких інших рухах заряджених частинок.

МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИНИ

Візьмемо котушку і стальний стержень, який не має магнітних властивостей, тобто такий, напруженість магнітного поля навколо якого дорівнює нулю. Якщо через котушку пропустити електричний струм, то навколо неї виникне магнітне поле і вона почне притягати залізні предмети.

Вставимо всередину соленоїда стальний стержень. Неважко переконатися, що стержень, вміщений у магнітне поле котушки, набуває магнітних властивостей. Тепер він притягує залізні предмети. При цьому магнітні властивості котушки з уставленим у неї стержнем (його називають сердечником) значно сильніші, ніж без сердечника. Напруженість магнітного поля котушки з сердечником значно більша, ніж котушки без сердечника. Котушка з уставленим у неї сердечником називається **електромагнітом** (рис. 26). Іноді електромагніти мають дві котушки, надіті на кінці U подібно зігнутого сердечника.



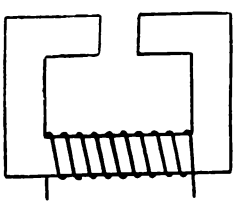


Рис. 26. Лабораторний електромагніт. Праворуч —одна з схем лабораторного електромагніту.

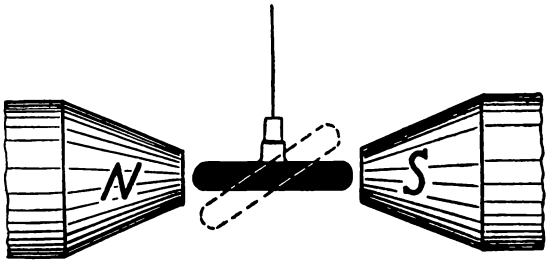


Рис. 27. Ампула, наповнена розчином парамагнітної речовини, повертається вздовж напряму магнітних силових ліній.

Отже, маючи джерело сильного магнітного поля — електромагніт, дослідимо, як поводитимуться різні речовини в магнітному полі. Як поводиться залізо, сталь у магнітному полі, ми вже знаємо. Коли внести в котушку з струмом залізний або стальний сердечник, він дуже намагнічується і напруженість магнітного поля біля котушки набагато зростає. А якщо замість стального взяти, наприклад, мідний або алюмінієвий стержень, то помітного збільшення напруженості магнітного поля не відбувається. Ці спостереження показують, що серед речовин є такі, які намагнічуються сильно, і такі, які якщо і намагнічуються, то дуже слабко. Речовини, які сильно намагнічуються, називаються феромагнітними. До феромагнітних речовин належать чотири чистих метали: залізо, кобальт, нікель і гадоліній, багато сплавів, а також окисли заліза, марганцю, кобальту та інших металів. Феромагнітні речовини, крім здатності дуже намагнічуватися, мають і ряд інших цікавих властивостей. Розглянемо деякі з них. Стальний стержень зберігає магнітні властивості довгий час і після вимкнення струму в котушці, тобто після того як магнітне поле котушки зникло. У більшій чи меншій мірі цю властивість мають усі феромагнітні речовини. Таким чином, феромагнітні речовини можна намагнітити, вносячи їх у магнітне поле, і вони можуть перебувати у намагніченому стані довгий час. Всі постійні магніти, які широко застосовуються в техніці, роблять з феромагнітних речовин. Здатність дуже намагнічуватися усі феромагнітні речовини втрачають, коли їх нагріти вище певної для кожної речовини температури. Для заліза ця температура дорівнює 768°С, для нікелю 365°С, для кобальту близько 1130°С. При зниженні температури феромагнітні властивості відновлюються.

З'ясуємо тепер, чи впливає магнітне поле на інші речовини, які не є феромагнітними.

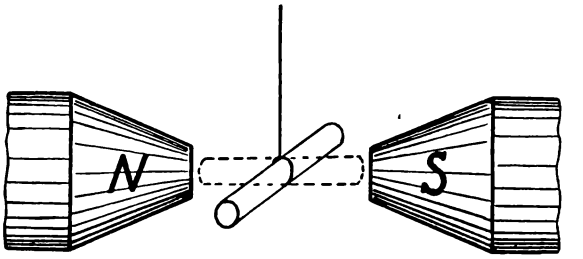


Рис. 28. Зразок з діамагнітної речовини повертається впоперек магнітних силових ліній.

Скористуємося для дослідів описаним вище електромагнітом. Будемо вміщувати між кінцями сердечника зроблені з різних речовин зразки. Якщо внести в магнітне поле стрілку з феромагнітної речовини, то вона, намагнітившись, повернеться вздовж напряму напруженості магнітного поля. Виявляється, що так само поводиться і багато інших речовин, які не є феромагнітними. Наприклад, так поводитимуться стрілки, зроблені з марганцю, хрому, платини та ін. Те, що стрілки, зроблені з цих речовин, орієнтуються завжди вздовж поля, указує, що ці речовини теж намагнічуються, тобто набувають магнітного момента, але тільки ступінь їх намагніченості дуже малий. Такі речовини називають парамагнітними. Парамагнітними є багато газів, наприклад, молекулярний кисень, окис азоту, і багато рідин. Так, наприклад, ампула з парамагнітним розчином хлористого заліза встановлюється вздовж магнітного поля (рис. 27). Таким чином, поведінка феромагнітних і парамагнітних речовин у магнітному полі однакова, тільки різко відмінна величина їх намагніченості.

Є ще й третій тип речовин, поведінка яких у магнітному полі істотно інша. Їх називають діамагнітними. Якщо паличку з вісмуту вмістити в магнітне поле, то вона повертається перпендикулярно до напряму магнітного поля (рис. 28). До діамагнітних речовин

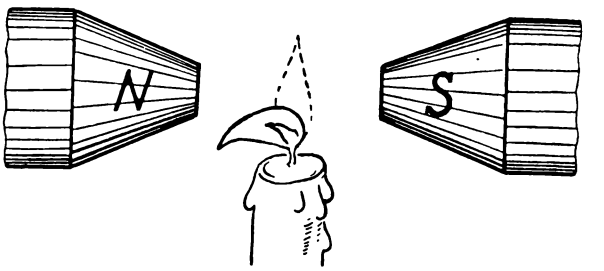


Рис. 29. Іонізовані гази діамагнітні, а тому полум'я свічки вишитовхується з магнітного поля.

належать мідь, алюміній, вісмут, срібло, сурма та ін. Діамагнітними є іонізовані гази, полум'я (рис. 29).

Сучасна фізика дає відповідь на питання про те, як зв'язані магнітні властивості різних речовин з їх атомною структурою.

Як відомо, атом будь-якої речовини складається з ядра і електронів, що навколо нього обертаються. Розглянемо рух одного з електронів навколо ядра. За одну секунду електрон робить навколо ядра мільйон мільярдів обертів. Через це рух одного електрона можна розглядати як замкнений струм. У магнітному відношенні такий замкнений струм еквівалентний котушці з одним витком. Окремий виток, як і котушка, має магнітний момент. Таким чином, обертання електрона навколо ядра можна розглядати як замкнений струм, який створює певне магнітне поле і має певний магнітний момент.

Але ж в усіх атомах (крім атома водню) або молекулах є кілька електронів. Кожний з них створює магнітний момент. Магнітні моменти електронів в атомі можуть бути напрямлені в різні сторони, так що результуючий магнітний момент усього атома або молекули, який дорівнює сумі магнітних моментів електронів, може бути рівним нулю. До таких речовин належать метали — мідь, алюміній, вісмут, сурма; гази — гелій, неон і деякі інші речовини. Усі ці речовини щодо своїх магнітних властивостей виявляються діамагнітними. Чому ж зразки з цих речовин повертаються перпендикулярно до напряму магнітного поля, в яке вони внесені, або виштовхуються з нього?

Виявляється, що при внесенні будь-якої речовини в магнітне поле рух електронів в атомах змінюється так, що всі атоми набувають магнітного момента і вся речовина стає намагніченою. Проте магнітне поле речовини буде протилежним зовнішньому магнітному полю. Тому речовина виштовхуватиметься з магнітного поля, в якому перебуває, або орієнтуватиметься так, щоб ослабити вплив цього поля.

Діамагнітний ефект дуже малий, а тому, хоч він і властивий всім речовинам, спостерігається він тільки у тих речовин, атоми яких не мають постійного результуючого магнітного момента. У всіх інших речовин він заглушається у багато разів переважаючим парамагнітним або феромагнітним ефектом.

В атомах парамагнітних речовин магнітні моменти окремих електронів такі, що повний магнітний момент атомів або молекул не дорівнює нулю.

Чому ж тоді ми не помічаємо намагніченості парамагнітних речовин, якщо вони не знаходяться в магнітному полі? Справа в тому, що внаслідок теплового руху атомів їх магнітні моменти розміщуються хаотично. Магнітний момент усього зразка, що дорівнює сумі магнітних моментів усіх атомів, в даному разі дорівнюватиме нулю. А якщо зразок внесено в магнітне поле, то магнітні моменти окремих атомів, подібно до маленьких магнітних стрілок, намагаються повернутися вздовж поля. Чим сильніше зовнішнє магнітне поле, тим більше число магнітних моментів встановлюється вздовж поля. Тепер магнітний момент усього зразка уже не дорівнює нулю, і зразок повернеться в магнітному полі так, що його магнітний момент відповідає напрямові зовнішнього магнітного поля. Таким чином, відмінність у поведінці парамагнітних і діамагнітних речовин визначається магнітними властивостями атомів речовини. Велику роль у розвитку вчення про магнітні властивості парамагнітних і діамагнітних речовин відіграли англійський учений Джозеф Лармор і французькі вчені П'єр Кюрі і Поль Ланжевен.

Властивості феромагнітних речовин зумовлені існуванням всередині цих речовин особливих областей довільного намагнічування. Коли немає магнітного поля, ці області орієнтовані хаотично, так що речовина в цілому не намагнічена.

При внесенні феромагнітного зразка у магнітне поле відбувається орієнтація не окремих атомів або молекул, як у випадку парамагнітних речовин, а цілих областей самодовільного намагнічування. Тому ефект буває дуже сильний.

В утворенні областей самодовільної намагніченості основну роль відіграють магнітні моменти електронів, які виникають внаслідок їх власного обертання. Це обертання схоже на обертання Землі навколо своєї осі.

У розвиток учення про магнітні явища в феромагнетиках великий вклад внесли і наші вітчизняні вчені: О. Г. Столєтов, Б. Л. Розінг, В. К. Аркадьєв, Я. І. Френкель і багато інших.

Магнітні властивості речовини широко використовуються в різних галузях науки і техніки. Особливо широко застосовують феромагнітні матеріали. Їх використовують для електричних генераторів і двигунів, для телефонних і телеграфних апаратів, радіоприймачів. Електромагніти застосовують в підйомних кранах для перенесення важких стальних і

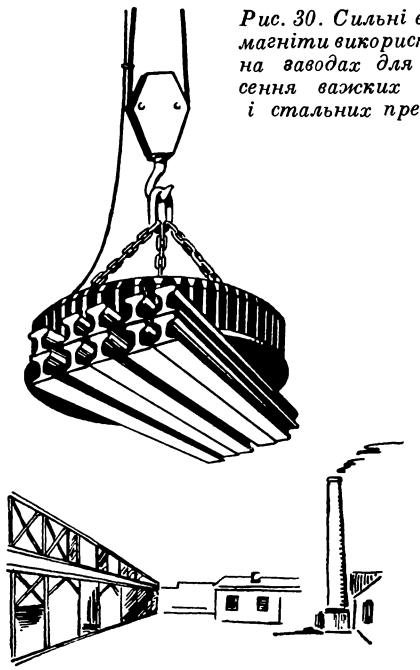


Рис. 30. Сильні електромагніти використовують на заводах для перенесення важких залізних і стальних предметів.

залізних предметів на заводах (рис. 30). Магніти використовують у вимірювальних приладах: амперметрах, вольтметрах, лічильниках електроенергії. Трансформатори, якими користуються для перетворення напруги і величини електричного струму, мають сердечники, зроблені з феромагнітних матеріалів. Феромагнетики використовують для добування ультразвукових коливань.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

Поворот магнітної стрілки біля провідника з струмом у дослідах Ерстеда вперше вказав на зв'язок електричних і магнітних явищ. Електричний струм створює навколо себе магнітне поле. А чи не можна викликати появу струму за допомогою магнітного поля? Таке завдання поставив М. Фарадей. У 1821 р. він записав у щоденнику: «Перетворити магнетизм в електрику». Успіх прийшов не відразу. Тільки глибока певність в єдності сил природи і наполеглива праця привели його через десять років до нового великого відкриття.

Розв'язання завдання довго не вдавалось Фарадею та іншим ученим, бо вони сподівались здобути струм у нерухомій котушці під впливом постійного магнітного поля. Тим часом, як з'ясувалося пізніше, тільки при зміні числа силових ліній магнітного поля, які пронизують котушку, в ній може виникнути струм.

Чудові досліди Фарадея тепер легко може проробити кожен. Для цього потрібен тільки магніт, дві дротяні котушки, джерело струму і гальванометр.

Закріпимо на підставці магніт і піднесемо до нього котушку, кінці якої приєднано до гальванометра (рис. 31). Повертаючи, нахиляючи і переміщуючи котушку вгору і вниз, ми змінюємо число силових ліній магнітного поля, які пронизують її витки. Гальванометр при цьому реєструє виникнення в котушці струму, величина і напрям якого змінюватимуться. Якщо магніт і котушка перебувають у спокої одно відносно одного, струму в котушці не буде.

Виникнення струму в котушці при зміні магнітного поля, яке пронизує котушку, має назву явища електромагнітної індукції. Струм, що при цьому виникає, називається індукційним.

Можна котушку лишати нерухомою, а переміщати магніт. Ефект буде той самий. Можна обійтися зовсім без магніту, використовуючи другу котушку. Якщо через одну з котушок пропустити струм, то при взаємному переміщенні котушок у другій котушці виникатиме індукційний струм. Можна, нарешті, надіти одну котушку на другу і змінювати величину струму в одній з них, замикаючи і розмикаючи ключ (рис. 32). В даному разі в другій котушці теж виникатиме індукційний струм, бо магнітне поле, яке пронизує котушку, змінюється.

Під час дослідів легко виявити, що при збільшенні числа силових ліній, які пронизують котушку, стрілка гальванометра відхиляється в один бік, а при зменшенні — в другий. Уважніше дослідження показує, що величина індукційного струму прямо пропорціональна швидкості зміни числа силових ліній, що пронизують котушку. В цьому суть закону електромагнітної індукції.

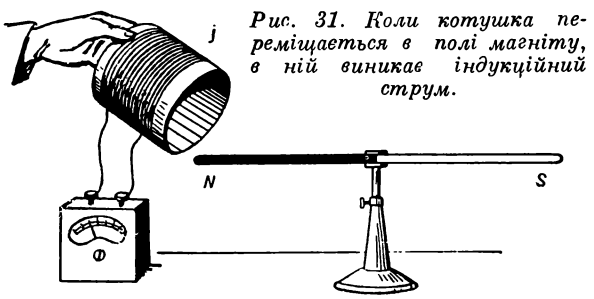


Рис. 31. Коли котушка переміщається в полі магніту, в ній виникає індукційний струм.

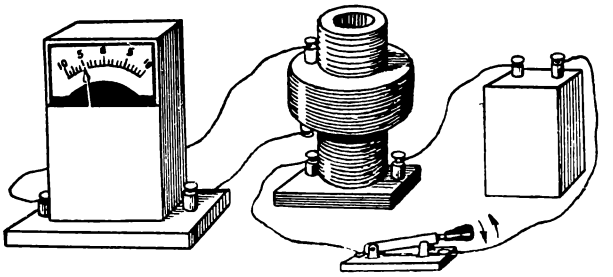


Рис. 32. Коли змінюється величина струму в одній котушці, в другій виникає індукційний струм.

Російський фізик Е. Х. Ленц дав правило для визначення напряму індукційного струму. Індукційний струм завжди має такий напрям, що створюване ним магнітне поле утруднює або гальмує рух, який викликає індукцію. Наприклад, при наближенні котушки до магніту індукційний струм, який при цьому виникає, має такий напрям, що створене ним магнітне поле буде протилежним магнітному полю магніту. В результаті між котушкою і магнітом виникають сили відштовхування.

Правило Ленца випливає з закону збереження і перетворення енергії. Якби індукційні струми прискорювали рух, який їх викликає, то створювалася б робота з нічого. Котушка сама собою після невеликого поштовху прямувала б назустріч магнітові, і одночасно індукційний струм виділяв би в ній теплоту. А в дійсності індукційний струм створюється за рахунок роботи по зближенню магніту і котушки.

Чому виникає індукційний струм? Глибоке пояснення явища електромагнітної індукції дав англійський фізик Джемс Клерк Максвелл — творець закінченої математичної теорії електромагнітного поля.

Щоб краще зрозуміти суть справи, розглянемо дуже простий дослід. Нехай котушка складається з одного витка дроту і пронизується змінним магнітним полем, перпендикулярним до площини витка. В котушці, природно, виникає індукційний струм. Надзвичайно сміливо і несподівано витлумачив цей експеримент Максвелл. При зміні магнітного поля в просторі, на думку Максвелла, виникає процес, для якого присутність дротяного витка не має ніякого значення. Головне тут — виникнення замкнених кільцевих ліній електричного поля, які охоплюють змінне магнітне поле (рис. 33). Під впливом електричного поля, що виникає, починають рухатися електрони, і у витку виникає електричний струм. Виток — це просто прилад, який дає можливість виявити електричне поле. А суть явища електромагнітної індукції в тому, що змінне магнітне поле завжди породжує в навколишньому просторі електричне поле з замкненими силовими лініями. Таке поле називається в и х р о в и м.

Досі ми мали справу з електричним полем, створюваним нерухомими електричними зарядами. Силові лінії такого поля починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних, тобто не замкнені. Таке поле, нагадаємо, називається потенціальним: робота сил цього поля при переміщенні електричного заряду не залежить від форми шляху. Вихрове поле не потенціальне. Робота по переміщенню електричного заряду у вихровому полі залежить від форми шляху, але все ж це електричне поле. Воно має головну властивість електричного поля — здатність діяти на електричний заряд.

Велике значення має особливий вид електромагнітної індукції — с а м о і н д у к ц і я.

Якщо взяти котушку з дуже великим числом витків, то при замиканні електричного кола, зображеного на рис. 34, лампочка засвічується не відразу. Затримка може тривати кілька секунд. Дуже разючий на перший погляд факт!

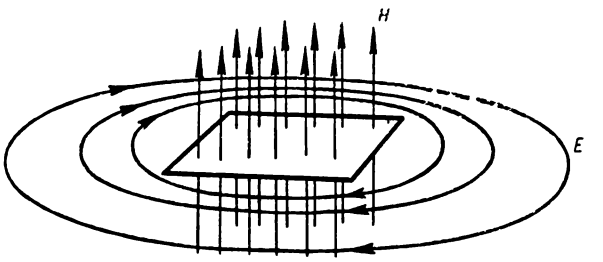


Рис. 33. Змінне магнітне поле породжує навколо себе замкнені лінії вихрового електричного поля.

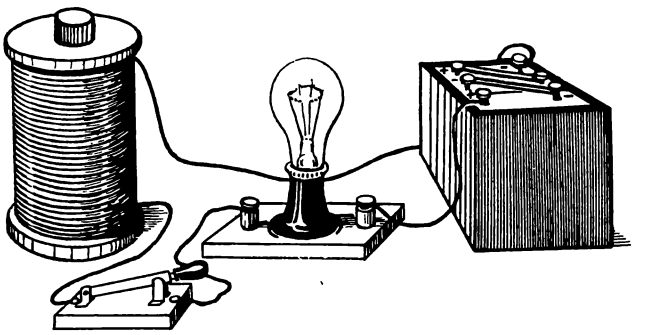


Рис. 34. При замиканні електричного кола з великою самоіндукцією лампочка спалахує не відразу.

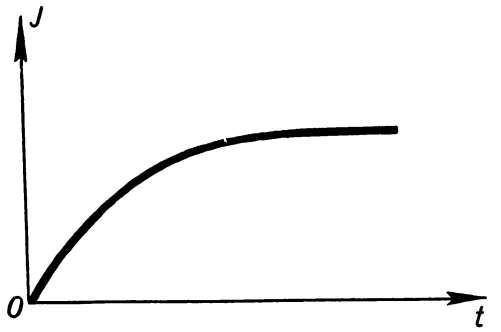


Рис. 35. Характер зміни величини струму з часом при замиканні електричного кола постійного струму.

Щоб зрозуміти, в чому тут справа, треба розібратися в тому, що відбувається в момент замикання кола електричного струму.

У момент замикання електричного кола по витках котушки починає проходити електричний струм. В ту ж мить у просторі навколо котушки виникає дедалі сильніше магнітне поле. Таким чином, витки котушки будуть пронизані змінним магнітним полем, яке концентрується сердечником, що міститься в котушці. У витках котушки збуджується індукційний струм, який при підсиленні магнітного поля (у момент замикання електричного кола) напрямлений проти основного струму.

Тому в момент замикання електричного кола струм не відразу досягає свого максимального значення, а зростає поступово (рис. 35), і саме тому лампочка не засвічується відразу.

При розмиканні електричного кола внаслідок явища самоіндукції індукційний струм підсилює основний струм, завдяки чому лампочка засвічується яскраво.

Це явище називається самоіндукцією тому, що зміна магнітного поля, яке збуджує індукційний струм у котушці, відбувається при зміні сили струму, що проходить по електричному колу. Напрям струму самоіндукції визначається правилом Ленца.

Самоіндукція нагадує інерцію в механіці. Справді, інерція приводить до того, що під впливом сили тіло набуває певної швидкості не відразу, а поступово. Так само внаслідок самоіндукції при вмиканні в електричне коло батареї струм встановлюється не відразу. Подібно до того, як швидкість не може зникнути відразу, не зникне вмить і струм.

Вихрові струми в масивних провідниках — ще один приклад електромагнітної індукції. Ви, мабуть, звертали увагу на те, що залізні сердечники трансформаторів, якорі електродвигунів і генераторів ніколи не роблять суцільними. Їх набирають з окремих тонких листів, ізольованих один від одного шаром лаку. Неважко зрозуміти, чим викликана така будова. У змінному магнітному полі внаслідок електромагнітної індукції сердечник пронизується силовими лініями вихрового електричного поля. Якби він був суцільним, то це поле викликало б індукційні струми великої сили, бо електричний опір куска металу невеликий. Сердечник розігрівся б, і більша частина електричної енергії втрачалася б марно. Крім того, треба було б вживати спеціальних заходів для охолодження. Ізоляційні шари не дозволяють індукційним струмам досягати значних величин.

Індукційні струми у масивних провідниках звичайно називають вихровими, бо лінії цих струмів замкнені подібно до силових ліній електричного поля, яке їх породжує. Вихрові струми використовують в індукційних металургійних печах для плавлення металів.

Цікаві явища виникають при взаємодії вихрових струмів з магнітним полем, в якому вони виникли. Внесемо, наприклад, п'ятикопієчну монету між вертикально розміщеними полюсами сильного електромагніту і впустимо її. Всупереч сподіванню, вона не впаде, як звичайно, а повільно опускатиметься. Щоб пройти кілька сантиметрів, їй потрібні будуть секунди. Рух монети нагадує рух тіла у в'язкому середовищі. Чому це відбувається?

Справа тут ось у чому. Вихрові струми, що виникають під час руху монети в неоднорідному магнітному полі, напрямлені, за правилом Ленца, так, що поле магніту виштовхує монету вгору.

Це явище використовують для заспокоєння коливань стрілок вимірювальних приладів. Алюмінієва пластина, що знаходиться між полюсами магніту, прикріплюється до стрілки, і вихрові струми, що в ній виникають, викликають швидке затухання коливань.

Надзвичайної краси демонстрацію явища електромагнітної індукції запропонував професор Московського університету В. К. Аркадьєв. Якщо над свинцевою чашею, що перебуває в надпровідному стані (рис. 36), впустити магніт, то він не впаде. Магніт повисне над чашею. Справа тут полягає в тому, що електричний опір надпровідника дорівнює нулю, тому струми, що в ньому виникають, дуже

великі і не зникають протягом довгого часу. За правилом Ленца, магнітне поле цих струмів має такий напрям, що воно відштовхує магніт і не дає йому впасти.

Цікаво відзначити, що якби магнітне поле Землі було велике і дуже неоднорідне, то швидкий рух провідних тіл став би неможливим. Вихрові індукційні струми, взаємодіючи з магнітним полем Землі, викликали б потужні гальмуючі сили. Літаки і ракети не могли б літати.

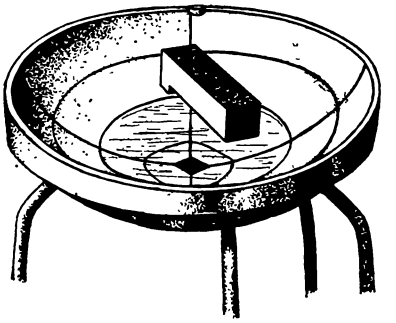


Рис. 36. Ширяючий магніт Аркадьєва.

ЯК ДОБУВАЮТЬ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

Дуже важливе практичне значення має застосування явища електромагнітної індукції в генераторах змінного і постійного струму. Майже вся електроенергія на земній кулі виробляється генераторами. В генераторах за допомогою явища електромагнітної індукції механічна енергія перетворюється в енергію електричного струму.

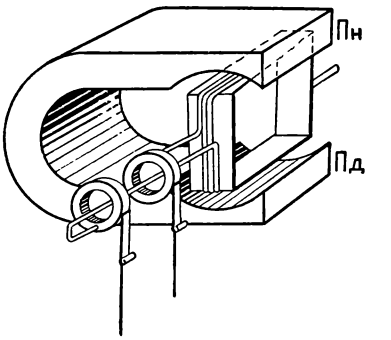


Рис. 37. Модель генератора змінного струму.

На рис. 37 ви бачите між полюсами магніту закріплену на осі котушку прямокутної форми. При обертанні котушки в ній виникає індукційний струм, який відводиться у зовнішнє електричне коло за допомогою спеціального пристрою, не порушуючи обертання котушки. Число силових ліній, що пронизують котушку, безперервно змінюється. Змінюється і швидкість зміни числа ліній. Тому в котушці виникає змінний електричний струм. Протягом однієї половини оберту він іде в один бік, а протягом другої половини оберту — в протилежний. Якщо електричне коло котушки не замкнене, то обертати котушку дуже легко. Треба тільки переборювати тертя у підшипниках. Проте досить увімкнути в електричне коло лампочку, і ми помітимо, що обертати котушку стане багато важче. Це показує, що індукційний струм, який в ній виникає, має такий напрям, щоб гальмувати рух, який його викликає. Все відбувається відповідно до правила Ленца. Поле магніту гальмує індукційний струм. Ось чому потужність, що витрачається на обертання генератора, залежить від характеру електричного кола, в яке він увімкнений. Чим менший опір кола, тим більша величина індукційного струму і тим більше гальмування. А опір електричного кола зменшується в міру збільшення числа споживачів електроенергії. Якщо їх немає зовсім, то електричне коло не замкнене і опір нескінченно великий.

ЗМІННИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

Якщо змінювати різницю потенціалів на кінцях електричного кола, в ньому виникає змінний електричний струм. З принципом дії генератора змінного струму ви вже знайомі.

Звичайний промисловий струм, який живить електроприлади, змінюється з часом. Характер цієї зміни зображено на рис. 38. За одну секунду струм робить 50 коливань, тобто 100 раз на секунду змінює свій напрям. Частота промислового струму дорівнює 50 коливанням на секунду.

Величина постійного струму на ділянці електричного кола, за законом Ома, визначається напругою на кінцях провідника і опором цієї ділянки. Із змінним струмом справа стоїть складніше.

Простий дослід доводить це. Складемо електричне коло з котушки з великою кількістю витків і лампочки. Неважко підібрати таку напругу, що лампочка ледве жевріти ме. Замінимо тепер постійну напругу змінною тієї ж величини. Лампочка зовсім погасне. Це свідчить про зменшення величини струму. Але ж опір лампочки і напруга не змінились. У чому ж справа? Пригадаємо, що, коли по провіднику пропускати змінний струм, виникає

Рис. 38. Як змінюється змінний струм з часом.

явище самоіндукції. При ввімкненні напруги струм завдяки явищу самоіндукції не зразу досягає максимального значення. Якщо напруга швидко змінюється, струм систематично не встигає зрости до максимальної величини. Чим більша самоіндукція провідника і чим швидше змінюється напруга, тим меншою буде середня величина струму. Це означає появу додаткового опору змінному струмові. Такий опір називається індуктивним.

Змінний струм істотно відрізняється від постійного ще в одному відношенні. Постійний струм не може йти по розімкненому електричному колу, наприклад, через конденсатор. Тільки в момент ввімкнення конденсатора в електричне коло з постійною напругою по колу піде струм. Але він припиниться після того, як конденсатор зарядиться і різниця потенціалів між пластинами дорівнюватиме напрузі джерела струму, і тільки при розряджанні конденсатора в електричному колі знову виникне струм.

А якщо ми ввімкнемо конденсатор в електричне коло змінного струму, він безперервно заряджатиметься і розряджатиметься і по електричному колу весь час ітиме струм. Таким чином, наявність в електричному колі конденсатора не є перешкодою для проходження по ньому змінного струму (це не означає, звичайно, що вільні електрони рухаються між пластинами конденсатора).

Конденсатор все ж ставить деякий опір змінному струмові, але він не буде нескінченно великим, як для постійного струму. Цей опір залежить від частоти змінного струму і ємності конденсатора.

Величина змінного струму, як і раніше, пропорціональна напрузі, але залежить не тільки від звичайного, омічного опору, але й від індуктивності та ємності електричного кола. Суть закону Ома зберігається, він тільки набирає складнішої форми.

Роль котушок самоіндукції і конденсаторів далеко не зводиться до появи в електричному колі індуктивного і ємнісного опору. В колі, що містить у собі котушку самоіндукції і конденсатор, виникають явища величезного практичного значення — електричні коливання.

ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Жодна складна електрична система не обходиться без трансформатора — приладу, дія якого грунтується на явищі електромагнітної індукції. Трансформаторами користуються для перетворення напруги і величини змінного струму.

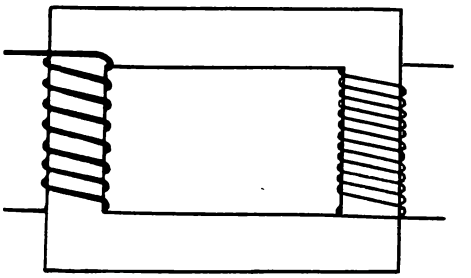


Рис. 39. Схема трансформатора.

Складається трансформатор з двох дротяних котушок, насаджених на один сердечник (рис. 39). При проходженні струму по одній з котушок (вона називається первинною обмоткою трансформатора) у другій котушці (вона називається вторинною обмоткою трансформатора), замкненій на зовнішнє електричне коло, індукується струм. Майже все магнітне поле зосереджене в сердечнику і пронизує обидві котушки. Найцікавіша особливість трансформатора полягає в залежності напруги на кінцях вторинної обмотки від співвідношення числа витків обох котушок. При однаковому числі витків однаковою буде і напруга на кінцях котушок. У скільки разів число витків вторинної обмотки перевищує число витків первинної, у стільки ж разів там буде більша й напруга. Такий трансформатор буде **підвищувальним**. У принципі справа тут у тому, що в кожному витку індукується однакова напруга, і чим більше витків, тим більша повна напруга.

Якщо число витків у вторинній обмотці менше, ніж у первинній, то трансформатор буде **знижувальним**. Напруга у вторинній обмотці менша, ніж у первинній. Підвищення напруги зв'язане із зменшенням величини струму в електричному колі вторинної обмотки. Зменшення ж напруги, навпаки, збільшує струм.

Застосовуються трансформатори в основному при передачі електроенергії на великі відстані. Втрати енергії на виділення тепла пропорціональні квадратові величини струму. Тому доцільно передавати тільки малі струми. Щоб за допомогою невеликих струмів передати велику потужність, потрібна напруга в десятки і навіть сотні тисяч вольтів. Будувати ж генератори, електродвигуни, розраховані на таку

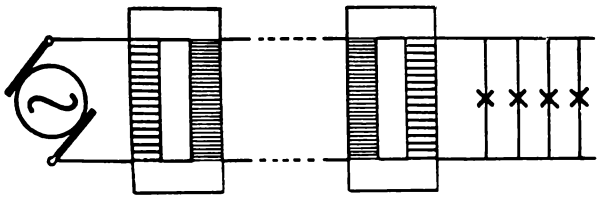


Рис. 40. Схема передачі електричного струму на великі відстані.

напругу — справа занадто складна, бо потрібна дуже добра ізоляція. Крім того, ця напруга смертельна. Давати її споживачеві не можна. Трансформатори дають можливість легко одержувати будь-яку напругу. На рис. 40 ви бачите схему передачі електроенергії на відстань.

Трансформатори не мають рухомих частин, не потребують нагляду, втрати енергії в трансформаторі незначні. Саме тому трансформатори набули дуже широкого застосування. Вони є в кожному радіоприймачі, в кожному телевізорі. Застосування на практиці в електричних сітках саме змінного струму, а не постійного, викликається в значній мірі простотою перетворення змінного струму в трансформаторі. Постійний струм перетворювати значно важче.

ТЕОРІЯ МАКСВЕЛЛА

Розглянемо уважніше, що відбувається в електричному колі змінного струму, в якому є конденсатор. При замиканні кола по провіднику піде струм. Навколо провідника виникнуть силові лінії магнітного поля.

Електричне поле між пластинами конденсатора убуватиме, бо заряд пластин зменшується, — процес, який, здавалось би, нічого спільного не має з струмом. Проте Максвелл зробив сміливе припущення про те, що змінне електричне поле, як і звичайний струм, створює навколо магнітне поле із замкненими силовими лініями (рис. 41). Ніяких вказівок на це з боку досліду в той час ще не було.

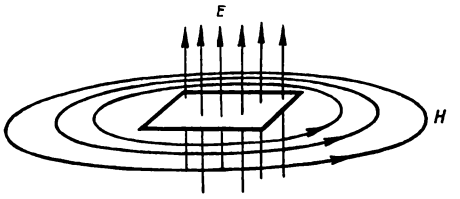


Рис. 41. Змінне електричне поле утворює навколо себе магнітне поле.

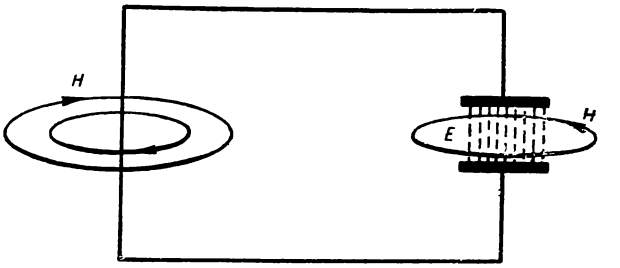


Рис. 42. Схема магнітного поля струму провідності і струму зміщення.

Процес зміни електричного поля в просторі Максвелл назвав струмом зміщення. Цей струм докорінно відрізняється від звичайного. Спільним для них є тільки одне: обидва вони створюють навколо себе вихрове магнітне поле (рис. 42). Розглядаючи змінне електричне поле в пустому просторі або в діелектрику як особливий струм, ми можемо кожний електричний струм вважати замкненим. При розряджанні конденсатора звичайний струм у провіднику (струм провідності) доповнюється в просторі між пластинами струмом зміщення.

Таким чином, згідно з гіпотезою Максвелла, змінне електричне поле створює вихрове магнітне поле, а змінне магнітне поле створює вихрове електричне поле.

Отже, змінні електричні і магнітні поля не можуть існувати в просторі незалежно. Виникнення одного з них відразу ж викликає появу другого.

Гіпотеза про струми зміщення дала можливість Максвеллові в 60-х роках минулого століття створити стрункy теорію електромагнітних явищ, яка охоплює всю величезну сукупність відомих у той час фактів і передбачає нові цікаві явища. Основні положення цієї теорії, викладені точною мовою математичних формул, висвітлюють взаємозв'язок електричних зарядів з електричними і магнітними полями. Звичайною мовою їх зміст можна передати приблизно так.

1. Магнітне поле з замкненими силовими лініями створюється або електричним струмом, або змінним електричним полем.

2. Електричне поле з замкненими силовими лініями (тобто вихрове) створюється змінним магнітним полем.

3. Силові лінії магнітного поля завжди замкнені.

4. Електричне поле з незамкненими лініями створюється електричними зарядами.

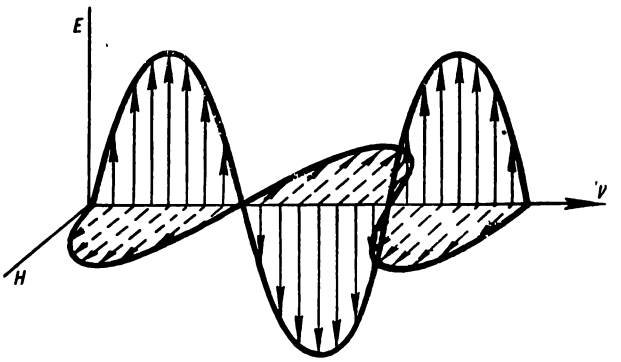


Рис. 43. Розподіл електричного і магнітного полів в електромагнітній хвилі.

Чудовим наслідком теорії Максвелла було те, що з неї автоматично випливала скінченність швидкості поширення електричного і магнітного полів. При виникненні, наприклад, електричного заряду електричне поле спочатку встановлюється тільки поблизу самого заряду і тільки потім поступово займає ввесь простір. Так само при вмиканні струму магнітне поле поступово поширюється все далі й далі від провідника. Правда, швидкість поширення поля дуже велика. Теоретично Максвелл показав, що вона дорівнює швидкості світла, тобто 300 тис. *км/сек*.

Змінне електричне поле, що виникає в просторі, збуджує навколо себе змінне магнітне поле. Це поле в свою чергу збуджує електричне поле і т. д. В результаті в просторі відбувається процес поширення електричного і магнітного полів. Цей процес проходить теж із швидкістю світла. Якщо початкове електричне поле змінюється періодично, то електромагнітне поле, що поширюється, теж має періодичний характер. Напруженість електричного і магнітного полів періодично змінюється в просторі і в часі. Так, з швидкістю світла поширюються електромагнітні хвилі. Характерно, що напруженості електричного і магнітного полів перпендикулярні одна до одної і до напряму поширення електромагнітної хвилі (рис. 43).

Максвелл передбачив існування електромагнітних хвиль і з того, що швидкість їх поширення дорівнює швидкості світла, зробив висновок про те, що світлові хвилі є електромагнітними за своєю природою. Тим самим учення про світло стало частиною вчення про електромагнітні явища.

Максвеллові не судилося дожити до блискучого підтвердження справедливості всіх його чудових відкриттів. Через 10 років після його смерті німецький фізик Герц експериментально виявив існування електромагнітних хвиль; виявилось, що швидкість поширення цих хвиль дорівнює швидкості світла. Тим самим електромагнітна теорія світла була доведена.

СВІТЛО І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Зором ми сприймаємо всю різноманітність барв природи і спостерігаємо динаміку явищ, що відбуваються навколо нас. З п'яти органів чуття найголовнішим у пізнанні природи є зір. Проте бачити навколишній світ ми можемо тільки тому, що його заливає світло.

Про те, що таке світло, яка його природа і як людина використовує різні властивості світла, розповідає ця стаття.

ПРЯМОЛІНІЙНЕ ПОШИРЕННЯ СВІТЛА

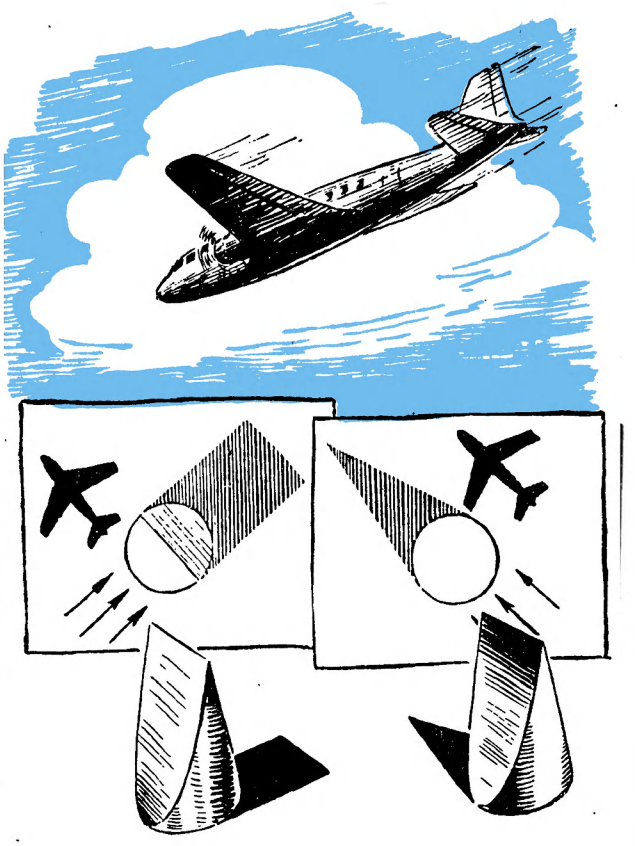
З раннього віку відбувається ознайомлення з світлом. З перших кроків ми переконуємося, що там, звідки приходить світло, є якісь предмети. Щоб наблизитися до одного з них, ми прямуємо назустріч світлу, що йде від нього. Шлях при цьому є найкоротшим по прямій лінії. Саме поняття прямої лінії, очевидно, виникло із спостереження за поширенням сонячного променя.

Світло від джерела в однорідному середовищі поширюється в усіх напрямах по прямих лініях.

Прямолінійне поширення світла — один з перших законів природи, з якими ознайомилася людина.

Закон прямолінійного поширення світла дає можливість з'ясувати причину утворення тіні. В цьому легко переконатися самому, наблизивши непрозорий предмет до освітленої стіни.

Тінь відкидають усі непрозорі тіла, розміщені на шляху світлових променів. А промені,



За формою тіні на аерофотознімках можна судити про предмет, але треба пильно придивлятися, з якого боку освітлено предмет.

що ковзають по контурах предмета, дають обриси його тіні.

По обрису тіні видно, яку форму має предмет, що відкидає тінь.

З давньої давнини дійшов до нас тіньовий театр. На екрані рухаються, жестикулюють темні силуети людей і ляльок, — це тіні акторів або спеціальних площинних маріонеток, що перебувають за екраном, і якими керують актори.

Але форма тіні іноді буває обманливою. Складіть кисті обох рук тильною стороною. Мізинці і вказівні пальці зачепіть один за одного, підмізинні і середні відігніть, а великий палець, що знаходиться зверху, притуліть до вказівних. Складені таким чином пальці рук піднесіть до освітленої стіни, і ви побачите тінь, що своїми обрисами нагадує зайця.

Тінь від предмета на фотознімку, зробленому з літака, дає можливість уявити предмет не тільки зверху, але й збоку.

За довжиною тіні, яку відкидає будь-який предмет, і за її положенням можна судити про пору дня. Тінь за давньої давнини правила за стрілку сонячного годинника — мабуть, найпростішого з усіх існуючих годинників.

Найкоротшими тіні бувають опівдні, коли сонце в зеніті, і найдовшими — коли воно заходить.

На основі закону прямолінійного поширення світла побудовано один з перших оптичних приладів — камеру-обскуру. Ви самі можете легко змайструвати цей прилад.

Для цього склейте з картону або з цупкого паперу прямокутний ящик. В одній з граней проколіть невеликий отвір, а протилежну грань замініть матовим склом — і камера-обскура готова. На матовому склі можна спостерігати зображення добре освітленого предмета, що знаходиться перед отвором камери.

Нехай вас не дивує, що зображення на склі буде перевернутим. Світлові промені, що поширюються прямолінійно від верхньої час-

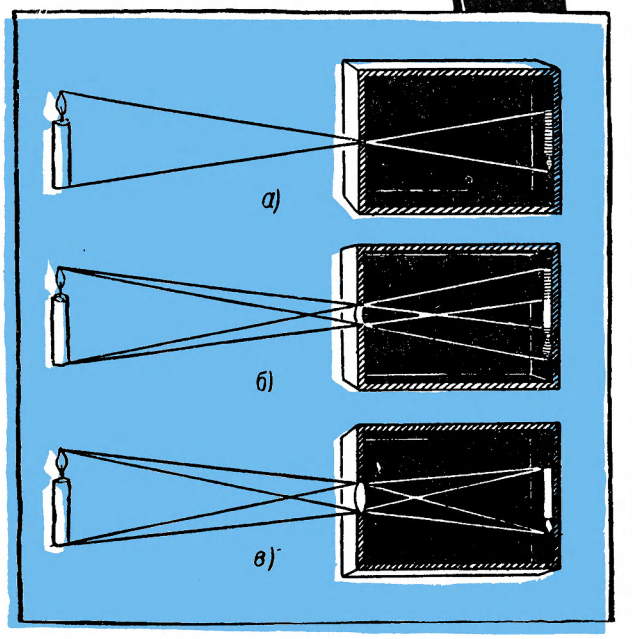
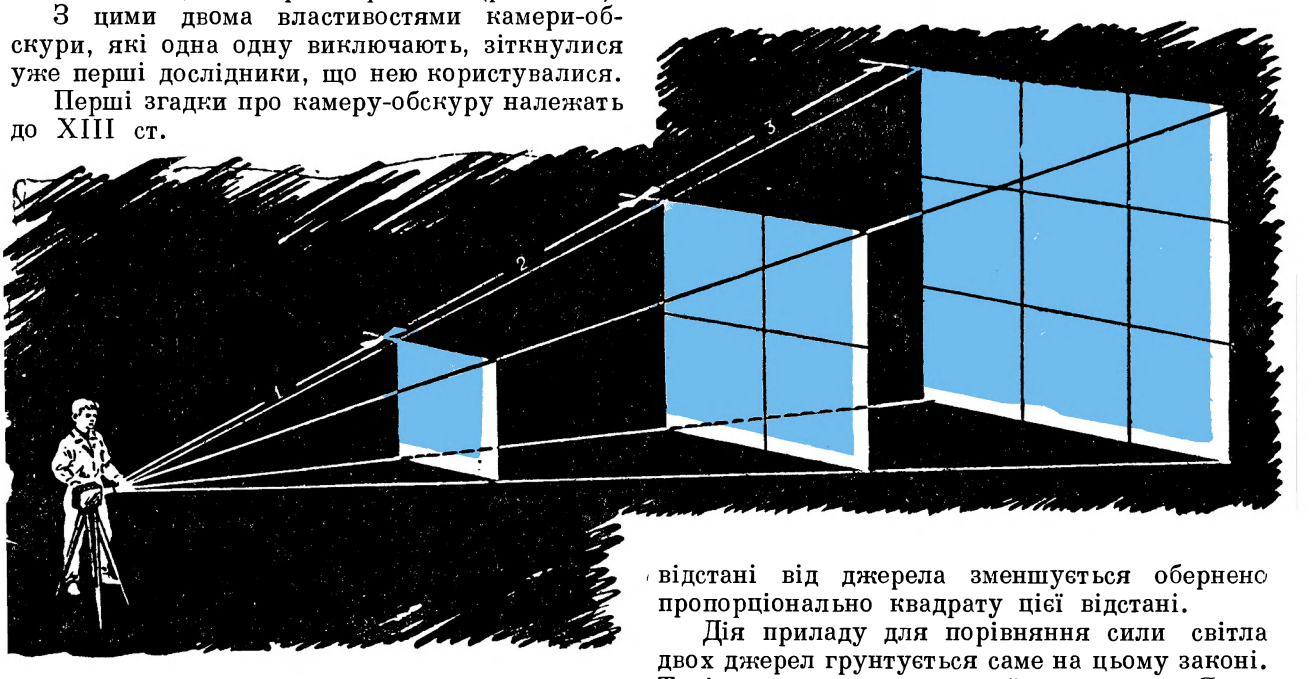


Рис. 1: а) зображення предмета, коли отвір у камері-обскурі малий; б) коли отвір значно більший, зображення втрачає різкість; в) якщо в отвір вставити вбирну лінзу, зображення стає чітким.

тини предмета, проходячи через отвір, попадають у низ протилежної грані, а від нижньої грані предмета — вгору. Тому зображення на екрані буде перевернутим. Не засмучуйтесь також і тим, що зображення буде не дуже ясним (рис. 1, *а*). Це буває тому, що отвір у камері ви зробили малий. Та не спішіть його збільшити! При більшому отворі зображення стає яснішим, але втрачає різкість (рис. 1, *б*).

З цими двома властивостями камери-обскури, які одна одну виключають, зіткнулися уже перші дослідники, що нею користувалися.

Перші згадки про камеру-обскуру належать до XIII ст.



Освітленість поверхні обернено пропорціональна квадрату відстані від джерела світла.

Природну камеру-обскуру можна спостерігати, перебуваючи в затінку дерева. Світло, проходячи крізь малі отвори між листками, створює на поверхні Землі (яка в даному разі є екраном) зображення Сонця. А якщо просвіти між листками великі, то світлові плями передають не зображення Сонця, а форму просвітів. Це можна простежити, спостерігаючи на підлозі або на стіні світло від електричної лампочки, яке пройшло крізь два отвори різних розмірів в аркуші цупкого паперу. Світло, яке проходить через малий отвір, утворює зображення волоска розжарення, а при більших розмірах отвору утворюється зображення самого отвору.

Особливо важливим є те, що закон прямолінійного поширення світла дає можливість обгрунтувати закон освітленості поверхні залежно від відстані до джерела світла.

Нехай, наприклад, світло від джерела падає на квадратний екран, розміщений від нього на деякій відстані. Якщо збільшити відстань удвоє, ми виявимо, що це саме світло освітлює екран, сторона якого вдвоє більша, ніж у попереднього, а поверхня, отже, вчетверо більша. При потроєній відстані поверхня збільшується в дев'ять раз. Кількість світла, яка припадає на одиницю поверхні екрана, при збільшенні відстані від джерела зменшується обернено пропорціонально квадрату цієї відстані.

Дія приладу для порівняння сили світла двох джерел грунтується саме на цьому законі. Такі прилади називають фотометрами. Якщо два джерела освітлюють однаково якусь площадку, то сили світла, яке вони посилають, відносяться одна до одної, як квадрати їх відстаней до екрана.

Закон прямолінійного поширення світла дає відповідь на питання про те, від чого залежать видимі розміри предметів. Промені, що потрапляють в око спостерігача від крайніх точок предмета, утворюють між собою кут. Цей кут називають кутом зору. Якщо кут зору малий, то зображення в оці буде малих розмірів і ми вважаємо, що спостережуваний предмет теж малий або знаходиться далеко від спостерігача.

ЗАКОН ВІДБИТТЯ СВІТЛА

Відбиття світла від гладкої поверхні помітили так давно, що важко з'ясувати, коли й хто встановив закон відбиття.

Вперше люди помітили цю особливість світла, очевидно, спостерігаючи водну поверхню водоймищ.

Ще не вміючи пояснити явище відбиття, але вже знаючи умови, при яких воно виникає, люди скористувалися ним для виготовлення штучних дзеркал.

Перші дзеркала були виготовлені задовго до нашої ери в Єгипті. Їх робили з міді й золота. Римляни використовували для цього бронзу. Дзеркалом із скла, вкритого з одного боку свинцем, почали користуватися тільки в XIII ст. Далі, через сто років, скло стали вкривати амальгамою з олова і ртуті. Тепер дзеркала для точних приладів роблять, наносячи шар срібла або алюмінію на шліфовану поверхню скла методом катодного розпилювання.

Що ж таке дзеркало?

Дзеркалом називають поверхню, яка правильно відбиває пучок світлових променів.

Відбиття вважають правильним тоді, коли весь пучок відбивається під тим самим кутом, під яким він падає на поверхню.

Якщо поверхня шорстка, то вона зустрічає пучок світла, що на неї падає, під різними кутами і відповідно під різними кутами відбиває його. Таке відбиття називають розсіяним.

Розсіяне відбиття дає, наприклад, матове скло.

Кут між падаючим променем і перпендикуляром до дзеркала в місці його падіння дорівнює кутові, що його утворює з цим перпендикуляром відбитий промінь. Промінь падаючий, відбитий і перпендикуляр до дзеркала лежать в одній площині.

Якщо відбиваюча поверхня плоска, то зображення розміщене симетрично відносно самого предмета. Саме поняття симетрії виникло з спостережень відбивання предметів у плоскому дзеркалі. Відбиваючу площину називають площиною симетрії.

Інша картина спостерігається тоді, коли дзеркало криве. Зображення в даному разі спотворене. Дзеркала, поверхні яких не плоскі, іноді дуже кумедно спотворюють предмет.

Особливу увагу стародавніх людей привертало дзеркало, відбиваючою поверхнею якого була внутрішня поверхня сфери. Таке дзеркало збирає сонячні промені в одну точку. Цю точку називають фокусом, що в перекладі з латинської означає «вогнище», тобто джерело вогню.

Вміщена в фокусі дзеркала займиста речовина може спалахнути. За переказом, старогрецький учений Архімед такими дзеркалами спалив римський флот. Неправдоподібність цього переказу не в тому, що взагалі неможливо спалити флот дзеркалами, а в тому, що дзеркала повинні були бути дуже великих розмірів, щоб фокуси були на значній відстані від їх поверхонь.

Відбиття — дуже важливе явище. Саме завдяки цьому явищу ми можемо бачити несвітні тіла. Світло від джерела (наприклад, від Сонця) падає на предмет і, відбиваючись від нього, потрапляє в наше око. Ми бачимо предмет.

ЗАЛОМЛЕННЯ СВІТЛА

Світло, що падає на межу двох прозорих середовищ, не тільки відбивається, але може частково проходити в друге середовище.

Так, світло, що падає на поверхню води, не тільки відбивається, але й проходить у воду. Завдяки цьому ми, наприклад, бачимо дно річки, риб, що плавають у воді, і т. д.

Отже, розглянемо явище переходу світла з одного середовища в інше.

Падаючи на межу поділу двох середовищ, світлові промені змінюють свій напрям, інакше кажучи, заломлюються. Ви можете переконатися в цьому на простому досліді.

Покладіть у посудину з непрозорими стінками яку-небудь монету. Якщо ваша посудина прозора, то її можна загородити непрозорим тілом, як на рис. 2. Поставте посудину на стіл і відійдіть від неї на таку відстань, щоб монету, яка в ній лежить, не було видно. Запам'ятайте місце, де ви стоїте, і, повернувшись до стола, потроху наливайте в посудину воду. При деякому рівні води в посудині ви виявите, що монету тепер уже видно з того самого місця, звідки раніше ви її не бачили. У чому ж тут справа? А ось у чому. Коли в посудині води ще не було, ви вибрали таке положення, при якому всі промені, відбиті від монети, поширюючись прямолінійно, не потрапляли в ваше око. А коли в посудину налили води, деяка частина променів, відбитих монетою, заломившись на межі води і повітря, пішла в такому напрямі, що промені потрапили у ваше око і ви побачили монету.

Дуже цікаве природне явище, яке полягає в тому, що Сонце можна бачити навіть тоді, коли воно вже зайшло за горизонт, пояснюється заломленням сонячних променів в атмосфері Землі.

Заломленням світлових променів пояснюється багато явищ природи, наприклад: чому

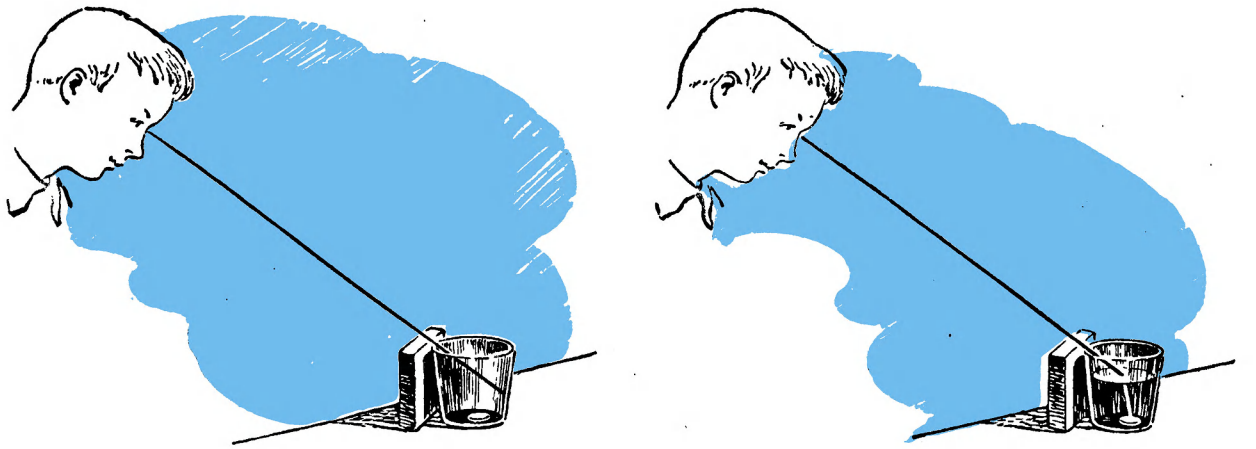


Рис. 2.

глибина струмка здається нам меншою від дійсної; чому предмети, які розглядаємо крізь скляну кулю з водою, здаються збільшеними; чому за допомогою скляної кулі з водою можна запалити вогонь, хоч при цьому вода в посудині залишається холодною; чому куля, виготовлена з льоду, теж збиратиме світло в точку і запалюватиме вогонь, а лід при цьому не розтане.

Багатовікові спостереження над ходом променя світла при переході його з повітря у воду і скло дали можливість з'ясувати, що кут, який утворює заломлений промінь з перпендикуляром до розділяючої поверхні в точці падіння світлового променя, менший, ніж кут падіння.

Знання закону заломлення навіть у такій загальній формі дало можливість зрозуміти поведінку світлових променів при проходженні крізь скляну пластинку з паралельними гранями, тригранну призму, крізь збирні і розсіювальні лінзи. І якщо причина більшого чи меншого заломлення була ще не ясна, то сам факт заломлення дозволив розмістити відомі прозорі речовини за ступенем заломлюваності в них світла.

Було встановлено, що різні сорти стекол по-різному заломлюють світло. Для збільшення заломлення знайшли навіть необхідні домішки, що їх додають тепер до скла при його виготовленні.

Особливістю поведінки світла при проходженні через збирну лінзу скористалися для того, щоб удосконалити камеру-обскуру. В отвір камери-обскури вставили збирну лінзу, і неясне зображення стало різким (рис. 1, *в*). Це вдосконалення було зроблено в кінці XVI ст. Камера-обскура, отвір якої закритий збирною лінзою, являє собою фотоапарат.

Проте фотографувати навчилися значно пізніше, тільки через три століття, коли відкрили хімічний вплив світла на емульсію бромистого срібла.

Дуже точні вимірювання кутів падіння і кутів заломлення, що їх утворюють світлові промені з перпендикуляром до поверхні поділу в місці падіння, зробив ще Птолемей. Проте встановити співвідношення між ними йому не вдалося.

Тільки в XVII ст. вчені змогли сформулювати точніше закони заломлення світла.

Голландський математик В. Снелліус твердив, що відношення косекансів кутів падіння і заломлення для двох даних середовищ лишається величиною сталою.

У 1637 р. Р. Декарт незалежно від нього виявив, що відношення синусів кутів падіння і заломлення для даної межі поділу середовищ лишається величиною сталою:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \text{const (величина стала).}$$

При цьому виявилось, що значення сталої залежить від того, з якого середовища падає світловий промінь на поверхню поділу.

Якщо, наприклад, світловий промінь переходить з повітря у воду, то стала в законі Снелліуса — Декарта дорівнює $\frac{4}{3}$. При переході променя в зворотному напрямі стала дорівнює $\frac{3}{4}$.

Величину сталої в кожному окремому випадку можна обчислити за відношенням сину-

сів кутів падіння і заломлення. Однак при цьому лишався неясним її фізичний зміст.

Відкриття закону заломлення навіть у такому вигляді дало можливість Декарту правильно пояснити явище райдуги як заломлення світла в краплинах дощу. Але кольоровість райдуги у той час була ще загадковою.

НЬЮТОН І ГЮЙГЕНС ПРО ПРИРОДУ СВІТЛА

З давніх часів про природу світла висловлювались найрізноманітніші міркування.

Але жодне з них не могло бути визнане задовільним, бо не пояснювало всієї різноманітності світлових явищ.

Теорія світлових явищ насамперед повинна була обгрунтувати такі міцно встановлені закони, як прямолінійне поширення, відбиття і заломлення світла.

Попередники Ньютона вважали, що світлові промені виходять не від світних тіл, а з очей: очі променями, мов щупальцями, обмацують предмети. Таке припущення легко спростувати: адже якби це було так, зауважують стародавні критики, то можна було б однаково добре бачити як при світлі, так і в темряві.

Ньютон, пояснюючи різні оптичні явища, виходив з аналогії в поведінці світлових променів і потоку швидких маленьких частинок — корпускул, випромінюваних світним тілом. Ця аналогія дала можливість Ньютонові теоретично обгрунтувати основні закони: прямолінійного поширення, відбиття і заломлення світла.

Погляди Ньютона на природу світла згодом стали називати корпускулярною теорією.

На думку Ньютона, закон прямолінійного поширення світла є наслідком закону інерції: світлові промені, виходячи із світних тіл, подібно до корпускул, на які не діють ніякі сили, рухаються рівномірно і прямолінійно.

Відбиття світла, за Ньютоном, підлягає законові пружного удару корпускул об межу поділу середовищ, при якому кут падіння дорівнює кутові відбиття.

Заломлення світла на межі поділу середовищ Ньютон пояснював зміною тієї складової швидкості корпускул, яка перпендикулярна до поверхні поділу.

Таким чином, причина заломлення світла на межі двох середовищ полягає у відмінності швидкостей поширення світла в різних середовищах. Якщо, наприклад, складова швидкості корпускули, перпендикулярна до поверхні поділу середовищ, у другому середовищі збільшується, то напрям результуючої швидкості утворює з перпендикуляром до межі поділу кут, менший, ніж кут падіння. А якщо складова швидкості зменшується, то кут заломлення при цьому стає більшим за кут падіння.

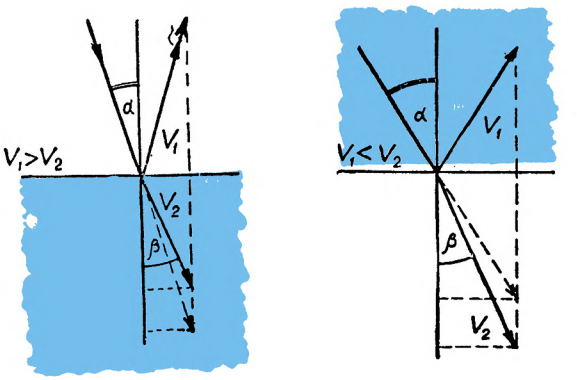


Рис. 3. Відбиття і заломлення світла за Ньютоном.

З геометричних міркувань (рис. 3) знаходимо:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_2}{v_1},$$

де α — кут падіння, β — кут заломлення, v_1 і v_2 — швидкість світла в першому і другому середовищах.

За теорією Ньютона, кут заломлення буде менший від кута падіння, якщо швидкість світла у другому середовищі більша, ніж у першому.

Сучасник Ньютона Хрістіан Гюйгенс не заперечував існування корпускул. Але він вважав, що їх не випромінюють світні тіла, а що вони заповнюють увесь простір. Процес поширення світла він мислив не як поступальний рух, а як послідовний процес передачі удару однієї корпускули об іншу.

Прихильники Гюйгенса висловлювали думку про світло як про коливання, що поширюється в особливому середовищі — ефірі, яким заповнений увесь світовий простір і який вільно проникає в усі тіла. Світлове збудження від джерела світла передається ефіром в усіх напрямах.

Основною цінністю хвильової теорії є принцип, вперше сформульований Гюйгенсом, а потім розвинутий О. Френелем.

Принцип Гюйгенса — Френеля твердить, що кожна точка, до якої дійшло світлове збу-

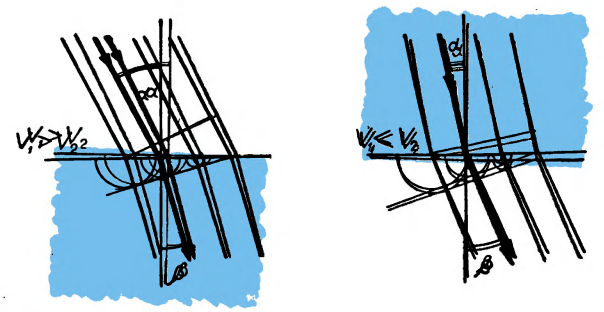


Рис. 4. Заломлення світла за Гюйгенсом.

дження, в свою чергу стає центром вторинних хвиль і передає їх в усіх напрямах сусіднім точкам.

Точки, до яких дійшли коливання в один і той же момент часу, утворюють фронт хвилі. Відстань, на яку переміщається фронт хвилі за час, що дорівнює періодові коливань, називають довжиною хвилі. Напрям поширення хвилі визначається перпендикуляром до її фронту. Таким чином, точки, що знаходяться одна від одної на відстані, яка дорівнює довжині хвилі, у напрямі її поширення коливаються в однакових фазах.

Хвильова теорія вважає, що в різних середовищах пружні властивості ефіру змінюються, а тому швидкість поширення світла в кожному середовищі своя. При переході хвилі з одного середовища в інше завдяки зміні швидкості відбувається заломлення (рис. 4).

Закон заломлення, згідно з хвильовою теорією, виражається формулою

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Порівнюючи результат хвильової теорії світла з тим результатом, який дає корпускулярна, бачимо, що хвильова теорія в законі заломлення дає обернену величину для значення сталої. Це означає, що коли швидкість поширення світла в другому середовищі більша, то кут заломлення буде не менший, а більший, ніж кут падіння.

Щоб відповісти на питання про те, яка з теорій дає правильну відповідь, треба було виміряти швидкість світла в різних середовищах. Виявилось, що вимірювання швидкості світла — дуже складне завдання, бо швидкість поширення світла надзвичайно велика. А тому численні спроби дослідників не мали успіху.

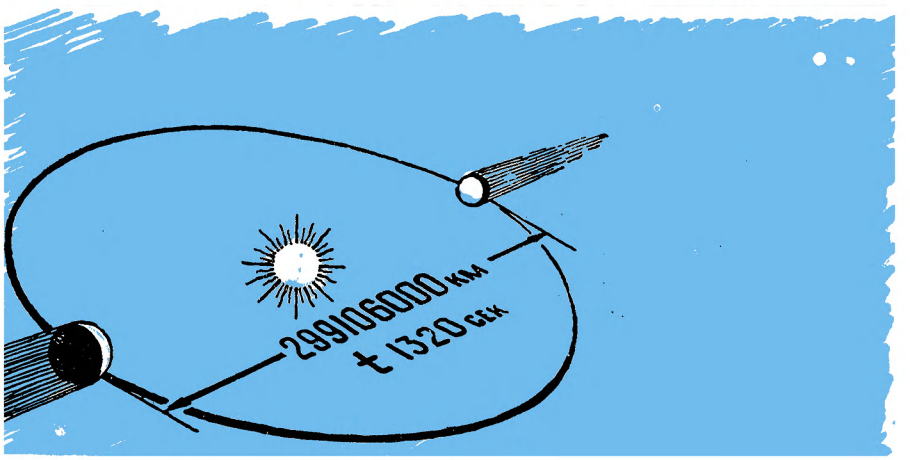
ПЕРШЕ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ СВІТЛА

Дотепно розв'язав складне завдання визначення швидкості світла в 1676 р. датський астроном Олаф Ремер.

Спостерігаючи рух супутників Юпітера, Олаф Ремер помітив, що під час затемнення супутник виходить з тіні, періодично запізнюючись. Ремер пояснював це тим, що на момент чергового спостереження Земля знаходиться в іншій точці своєї орбіти, ніж попереднього разу, і, отже, відстань між нею і Юпітером інша. Максимальна величина, на яку збільшується ця відстань, дорівнює діаметрові земної орбіти. І саме тоді, коли Земля найбільше віддалена від Юпітера, супутник виходить з тіні з найбільшим запізненням.

Порівнявши ці дані, Ремер прийшов до висновку, що світло від супутника проходить відстань, яка дорівнює діаметрові земної орбіти — 299 106 тис. *км* за 1320 сек. Такий висновок не тільки переконує в тому, що швидкість поширення світла не може бути миттєвою, але й дає можливість визначити величину швидкості; для цього треба поділити величину діаметра орбіти Землі на час запізнення супутника.

За обчисленнями Ремера, швидкість поширення світла дорівнює 215 тис. *км/сек.*



Вимірюючи час запізнення супутника Юпітера, Ремер обчислив швидкість світла.

Дальші, досконаліші методи спостереження за часом запізнювання супутників Юпітера дали можливість уточнити цю величину. Швидкість поширення світла, за сучасними даними, дорівнює 299 998,9 *км/сек*. Для практичних розрахунків вважають, що швидкість світла у вакуумі дорівнює 300 тис. *км/сек*. Величезне числове значення швидкості світла вразило не тільки сучасників Ремера, але й стало приводом для заперечення корпускулярної теорії світла.

Якщо світло — потік корпускул, то при такій швидкості руху енергія їх повинна бути дуже велика. Удари корпускул, коли вони падають на тіла, повинні бути відчутними, тобто світло повинно спричиняти тиск!

Після Ремера швидкість світла виміряв Джемс Брадлей. Переїжджаючи одного разу через р. Темзу, Брадлей звернув увагу на те, що під час руху човна вітер дув ніби в іншому напрямі, ніж це було насправді. Це спостереження, очевидно, і дало йому підставу пояснити аналогічним явищем позірний рух нерухомих зір, який називають а б е р а ц і є ю світла.

Світло від зорі досягає Землі подібно до того, як краплини прямовисного дощу падають на вікна рухомого вагона. Рух світлового променя і рухи Землі додаються.

Отже, щоб світло від зорі, розташованої перпендикулярно до площини руху Землі, потрапляло в телескоп, його треба нахилити на деякий кут, який залежить не від відстані до зорі, а тільки від швидкості світла і швидкості руху Землі (вона була в той час уже відома — 30 *км/сек*).

Вимірявши кут, Брадлей обчислив, що швидкість світла дорівнює 308 тис. *км/сек*. Вимірювання Брадлея, як і Ремера, не розв'язували спірного питання про значення сталої в законі заломлення, бо Брадлей і Ремер визначали швидкість світла не в якомусь середовищі, а в космічному просторі.

Ідею нового методу вимірювання швидкості світла запропонував Д. Араго. Здійснили її двома різними способами І. Фізо і Л. Фуко.

Фізо в 1849 р. старанно виміряв відстань між двома пунктами. В одному з них він поставив джерело світла, а в другому — дзеркало, від якого світло мало відбитися і знову повернутися до джерела.

Для того щоб визначити швидкість поширення світла, треба було дуже точно виміряти проміжок часу, необхідний світлу для того, щоб пройти подвоєний шлях від джерела до дзеркала.

Відстань від джерела, розміщеного в передмісті Парижа Сюрені, до дзеркала, встановленого на Монмартрі, становила 8633 *м*. Значить, подвоєна відстань дорівнювала 17 266 *м*. Час, протягом якого світло пройде цю відстань, якщо скористатися результатами вимірювання швидкості світла Ремера, буде не більший як шість стотисячних частин секунди.

Засобів для вимірювання таких малих проміжків часу тоді не було.

Отже, ці вимірювання треба було виключити з досліду.

У Сюрені було встановлено зорову трубу, напрямлену на Париж. Збоку через іншу трубку надходило світло від джерела. Від поверхні прозорої скляної пластинки, розміщеної в трубці під кутом 45°, світло частково відбивалося в напрямі до Парижа.

У Парижі на Монмартрі було встановлено іншу зорову трубу, в яку потрапляло світло, відбите прозорою пластинкою.

Дивлячись в окуляр, можна було бачити джерело світла, розміщене за бічною трубкою. Окуляр труби, встановленої на Монмартрі, замінили дзеркалом, завдяки чому світло поверталося в Сюрен.

Відбите дзеркалом на Монмартрі світло, повертаючись назад і зустрівши всередині труби прозору скляну пластинку, частково відбивалося від її поверхні, а світло, що пройшло через пластинку і окуляр труби, потрапляло в око спостерігача. Така конструкція давала можливість спостерігачеві бачити в окулярі зорової труби світло від джерела, яке надходило через бічну трубку.

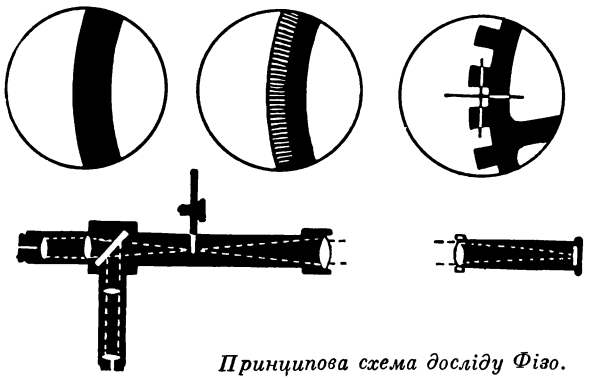
Зорова труба в Сюрені, крім бічної трубки, крізь яку надходило світло, мала проріз у тому місці, де був фокус об'єктива і окуляра. Крізь проріз проходило зубчасте колесо, що приводилось у рух годинниковим механізмом. Коли колесо було нерухоме і встановлене так, що світло проходило між зубцями, то в окулярі труби було видно світло, відбите від дзеркала на Монмартрі.

Коли колесо почало рухатись, світло зникло. Сталося це в той момент, коли світло, що пройшло між зубцями колеса в напрямі до Парижа, повертаючись назад, зустріло зубець, а не проміжок між зубцями.

Для того щоб світло в окулярі появилося знову, треба було подвоїти число обертів колеса.

При дальшому збільшенні числа обертів світло знову зникло.

У дослідах Фізо зубчасте колесо мало 720 зубців. Перше зникнення світла спостеріга-



Принципова схема досліду Фізо.

лось, коли колесо робило 12,67 оберту на секунду.

Один оберт воно робило за час, що дорівнює $\frac{1}{12{,}67}$ сек. При цьому проміжок між зубцями замінявся зубцем. Якщо зубців 720, то проміжків теж 720. Отже, заміна відбувається за час, що дорівнює $\frac{1}{12{,}67 \cdot 2 \cdot 720} = \frac{1}{18\,245}$ сек.

За цей час світло проходило подвійну відстань від Сюрена до Монмартра.

Отже, його швидкість дорівнювала 315 тис. *км/сек.*

Таким дотепним методом удалось уникнути вимірювань малих проміжків часу і все ж визначити швидкість світла.

Порівняно велика відстань між джерелом світла і дзеркалом не давала можливості поставити на шляху світла будь-яке середовище. Фізо визначив швидкість світла в повітрі.

Швидкість світла в інших середовищах визначив Фуко в 1862 р. В дослідах Фуко відстань від джерела до дзеркала була всього кілька метрів. Це дало змогу поставити на шляху світла трубку, заповнену водою.

Фуко встановив, що швидкість поширення світла в різних середовищах менша, ніж у повітрі. У воді, наприклад, вона дорівнює $\frac{3}{4}$ швидкості світла в повітрі. Одержані результати розв'язали двохсотлітній спір між корпускулярною і хвильовою теоріями про величину сталої в законі заломлення. Правильне значення сталої в законі заломлення дає хвильова теорія світла.

Вимірювання швидкості поширення світла в різних середовищах дозволили ввести поняття оптичної густини речовини.

Оптичною густиною речовини, або абсолютним показником заломлення, називають відношення швидкості поширення світла в безповітряному просторі до швидкості його поширення у будь-якій даній речовині. Ця величина в усіх випадках перевищує одиницю, бо швидкість поширення світла в безповітряному просторі більша, ніж у будь-якій речовині.

У практиці часто буває зручно користуватися відносним показником заломлення, який дорівнює відношенню швидкості поширення світла в другому середовищі до швидкості в першому середовищі.

ЯВИЩЕ ПОВНОГО ВІДБИТТЯ

У 1611 р. Йоганн Кеплер опублікував свою теоретичну працю з оптики.

Вивчаючи заломлення світла, він виявив, що для скла кут заломлення не перевищує 42°. Звідси він робить висновок, що коли світло спрямувати із скла в повітря під кутом, більшим як 42°, то воно не перейде із скла в повітря, а цілком відіб'ється.

Відкрите Кеплером явище привернуло увагу дослідників, і ним не перестають цікавитися і тепер.

Повне відбиття настає при кутах падіння, що перевищують деякий граничний. Граничним кутом падіння називають такий кут падіння, при якому кут заломлення стає рівним 90°.

Це можливо при переході світла із середовища з більшою оптичною густиною в середовище з меншою оптичною густиною. Відносний показник заломлення в даному разі менший від одиниці.

Явище повного відбиття широко використовується в перископах, біноклях (рис. 5) та інших оптичних приладах.

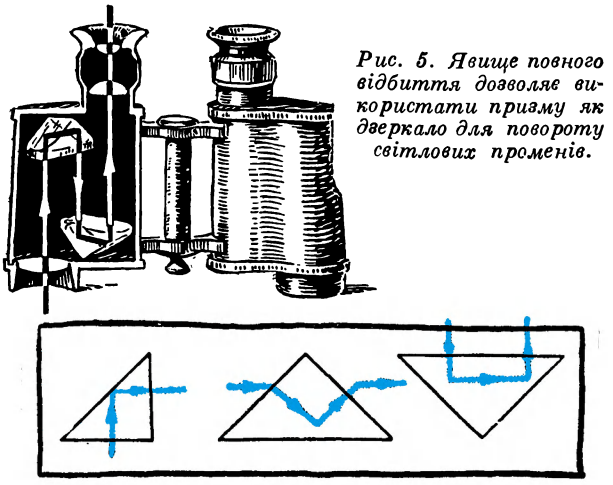


Рис. 5. Явище повного відбиття дозволяє використати призму як дзеркало для повороту світлових променів.

ГОЛУБА ОПТИКА

Історія голубої, або просвітленої, оптики почалась з того, що об'єктив фотоапарата було зібрано з старих лінз.

Апарат дав несподіваний ефект. Було виявлено, що кількість світла, яке проходить крізь його об'єктив, значно більша за ту, яку пропускає об'єктив з лінзами з тільки що виготовленого скла.

Це зацікавило дослідників. Уважне вивчення давно виготовлених стекол показало, що з часом скло старіє і на його поверхні утворюється плівка окису голубого забарвлення. Окислена поверхня скла пропускає світла більше, ніж неокислена.

Кількість світла, що його відбиває або пропускає поверхня поділу середовища, залежить від величини відносного показника заломлення. Чим менше відносний показник заломлення відрізняється від одиниці, тим більше світла при всіх кутах падіння проникає крізь поверхню поділу.

Оптична густина повітря, або абсолютний показник заломлення, $n_п = 1{,}0$, а оптична густина скла $n_с = 1{,}5$. При падінні світла з повітря на скло відносний показник заломлення поверхні поділу повітря — скло дорівнюватиме

$$n = \frac{n_п}{n_с} = \frac{1{,}5}{1{,}0} = 1{,}5.$$

Якщо на склі є плівка окису, оптична густина якої менша, ніж скла, то відносний показник заломлення поверхні поділу зменшується, а це приводить до того, що така поверхня менше відбиває світло.

Тепер нема потреби роками чекати старіння скла, поки сама собою утвориться плівка окису. При виготовленні скла для об'єктивів до нього додають домішки, які прискорюють процес утворення оксидної плівки.

Ще простіше створити просвітлений об'єктив, якщо на поверхню об'єктива нанести тонкий шар певної речовини, яка за своїми властивостями заміняє плівку окису.

СПРИЙМАННЯ СВІТЛА ОКОМ

Ще в XV ст. знаменитий художник і вчений Леонардо да Вінчі висловив думку про те, що ми сприймаємо об'ємність предметів завдяки тому, що бачимо світ двома очима.

Сучасники Леонардо не звернули уваги на його висловлювання. Тільки в 30-х роках XIX ст. це відкриття заново зробив англійський учений Уїтстон.

Як же створюється зорове враження об'ємності предмета? Через те що очі розміщені на деякій відстані одне від одного, то в кожному оці утворюється зображення розглядуваного предмета під різними кутами зору. Поєднання двох зображень від предмета, що розглядається під різними кутами зору, в одно створює зорове враження об'ємності. Зображення створюються на сітківці нашого ока і сприймаються нервовими корінцями.

Зіниця ока подібна до отвору діафрагми і буває відкрита то більше, то менше залежно від освітлення. Отвір засклено кришталиком — «лінзою».

За допомогою особливих м'язів, що змінюють кривизну кришталика, відбувається зміна його фокусної відстані. Таке «наведення» ока на різно віддалені предмети називається а к о м о д а ц і є ю ока.

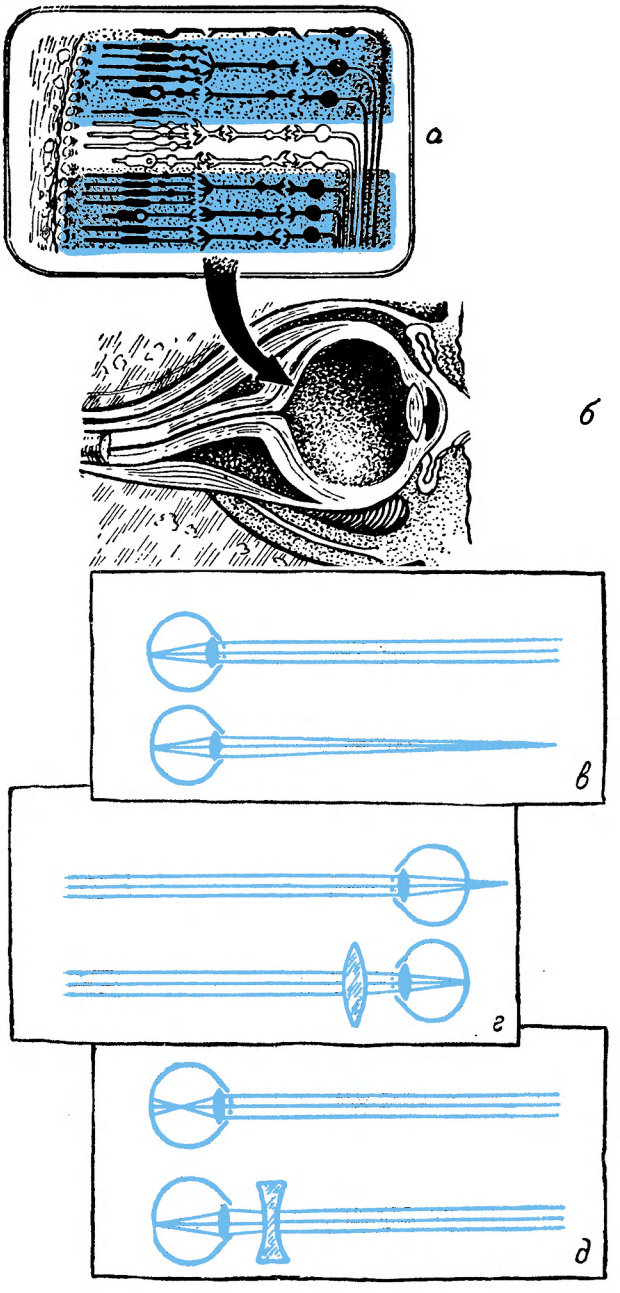
Райдужна оболонка відіграє роль діафрагми. Вона регулює, обмежує світловий потік, що проникає через зіницю ока. Зміна величини зіниці — отвору райдужної оболонки—визначає світлову силу і глибину фокусування зображення, яке утворюється на сітківці ока.

Коли фокус кришталика завжди збігається з сітківкою — зір нормальний. Коли фокус ближче або далі від сітківки — зображення стає неясним. Тоді фокусування кришталика виправляють додатковими лінзами — окулярами.

Наближаючи предмет до ока поступово, ми бачимо його дедалі краще, розрізняючи дрібніші його деталі. Предмет видно найясніше, якщо він знаходиться на відстані 25 *см* від ока. Цю відстань називають в і д с т а н н ю н а й к р а щ о г о з о р у.

Книгу під час читання слід тримати на відстані найкращого вору.

Світлове відчуття виникає при освітленні сітківки ока. Сітківка — це світлочутлива тканина, що вистилає дно очного яблука. Світлочутлива тканина не що інше, як розгалужена сітка волокон зорового нерва.



Будова ока людини: а — світлочутливі елементи ока; б — будова ока; в — нормальний зір; г, д — зір, виправлений додатковими лінзами.

Світлочутливими елементами ока є так звані колбочки і палички, розміщені в найнижчому шарі сітківки.

Кількість колбочок і паличок різна, і розміщені вони нерівномірно. З 130 млн. паличок більша частина знаходиться біля краю сітківки. В міру наближення до центра серед паличок дедалі частіше трапляються колбочки. Трохи вбік від оптичної осі кришталика у дні очного яблука є ямка, яка заповнена самими колбочками. З загальної кількості 7 млн. їх там є близько 15 тисяч. Ділянка поблизу ямки називається жовтою плямою.

Жовта пляма дає можливість добре розрізняти найдрібніші деталі. А якщо зображення предмета утворюється в самій ямці, то деталі видно особливо виразно. Поле зору жовтої плями характеризується кутом, близьким по горизонталі до 8°, а по вертикалі — до 6°. Поле зору ямки не перевищує 1—1°,5. Завдяки здатності очного яблука обертатися поле зору ока досягає 150° при досить ясному зображенні деталей предмета, що проектуються на жовту пляму.

Найчутливішими до світла є палички, зате колбочки чутливі до кольору. Тому в присмерку, коли освітленість мала, око погано розрізняє кольори.

У зоровому сприйманні вдень палички відіграють менш помітну роль, ніж колбочки. Це дало привід розрізняти денний і присмерковий зір залежно від того, які чутливі елементи більше сприяють зоровому сприйманню в даний момент.

Зорове відчуття, створюване паличками, виникає завдяки пігментові, який є на кінці палички,— так званому зоровому пурпурові. Під впливом світла він розкладається, подразнюючи зоровий нерв. Зоровий пурпур червоного кольору. Саме тому він добре вбирає короткі хвилі видимого спектра, які переважають у присмерковому освітленні. При сильному освітленні він може зовсім розкластися, тоді паличка тимчасово вибуває з ладу. Але потім вона потроху відновлюється. Ця особливість дає змогу окові пристосовуватися до зміни освітлення.

Чутливість ока лежить у дуже широких межах: від $2 \cdot 10^{-10}$ *ерг/сек* до $2 \cdot 10^{2}$ *ерг/сек*.

Зорове відчуття, створюване колбочками (кольоровий зір), ще не досить вивчено.

Основну ідею пояснення кольорового зору висунув М. В. Ломоносов. Сприймання будь-якого кольору відбувається як сприймання трьох основних кольорів: червоного, зеленого

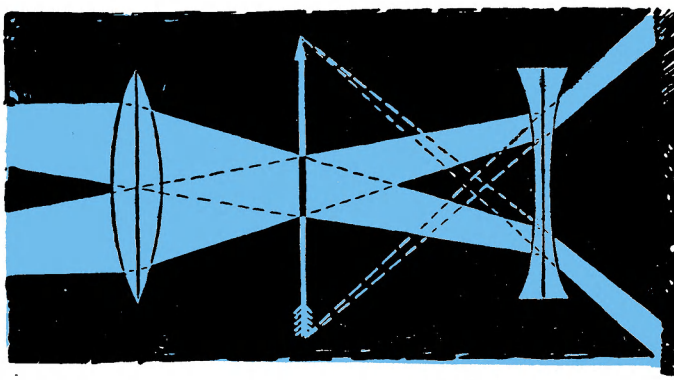
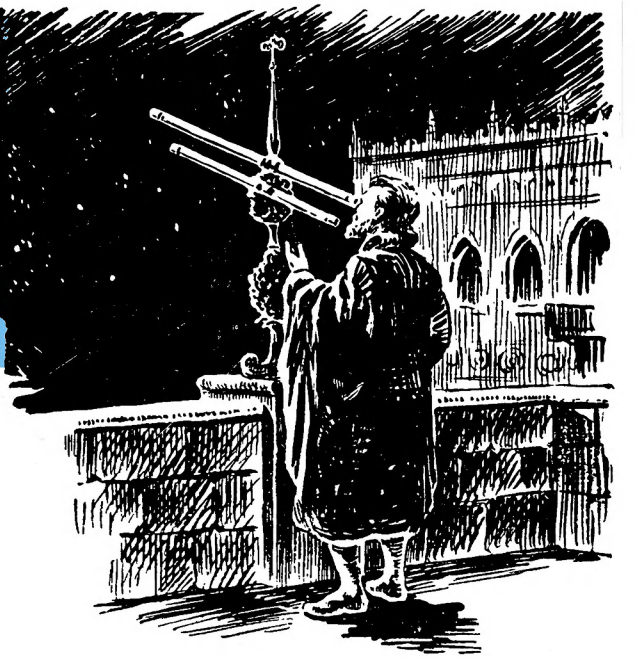


Схема труби Галілео Галілея.



і фіолетового — в різних пропорціях. Згодом ідеї Ломоносова були розвинуті в стрункy теорію, яку назвали трикомпонентною теорією зору.

ЗОРОВІ ТРУБИ

Предмет не можна бачити, якщо він знаходиться дуже близько до самого ока або, навпаки,— занадто далеко від нього. Ця особливість ока була відома ще за давньої давнини.

У першому випадку дуже легко вийти з становища: треба тільки відсунути предмет на деяку відстань від ока. А як бути в тих випадках, коли нема можливості наблизитися до предмета?

Про те, що за сивої давнини вміли бачити далекі предмети і розрізняти їх деталі, свідчить один арабський переказ. Згідно з цим переказом, в Александрії, розташованій на середземноморському узбережжі Африки, на маяку стояло величезне дзеркало, яке давало можливість бачити кораблі, що відпливали від берегів Греції. Якщо не брати переказ під сумнів, то, очевидно, на маяку в Александрії було вгнуте дзеркало і лінза. Такий прилад давав можливість розгледіти кораблі якщо не біля берегів Греції, то у всякому разі на далекому горизонті.

На початку XVII ст. з Голландії поширилась чутка про те, що за допомогою стекол можна бачити далекі предмети.

Важко сказати, від кого запозичили цю ідею сміливі купці Голландії, що борознили на парусних суднах води морів і океанів, шукаючи нових шляхів у невідомі країни.

У 1608 р. уряд Голландії одержав кілька заявок з проханням видати патент на зорову трубу. Патент, однак, нікому з претендентів не видали. У 1609 р. Галілей, почувши про цей винахід, почав міркувати над будовою такої труби і незабаром сконструював зорову трубу. Схема труби Галілея досі застосовується в деяких схемах біноклів. Спрямувавши свою зорову трубу на небо, Галілей з її допомогою зробив багато дивних відкриттів, які підтверджують справедливість учення Коперніка.

У 1610 р. у Венеції вийшов його трактат. Цей трактат мав величезний заголовок: «Зоряний вісник, що сповіщає про великі і дивні видовища і подає їх до уваги філософам і астрономам, які спостерігав Галілео Галілей за допомогою недавно винайденої ним зорової труби на поверхні Місяця, в незчисленних нерухомих зорях, у Молочному Шляху, в туманних зорях, а особливо при спостереженні чотирьох планет, що обертаються навколо Юпітера в різні проміжки часу з дивною швидкістю, планет, які до останнього часу нікому не були відомі і які автор зовсім недавно відкрив перший і вирішив назвати Медицейськими світилами».

Це далеко не повний перелік астрономічних спостережень, що їх виконав Галілео Галілей за допомогою винайденої ним труби менш як за один рік!

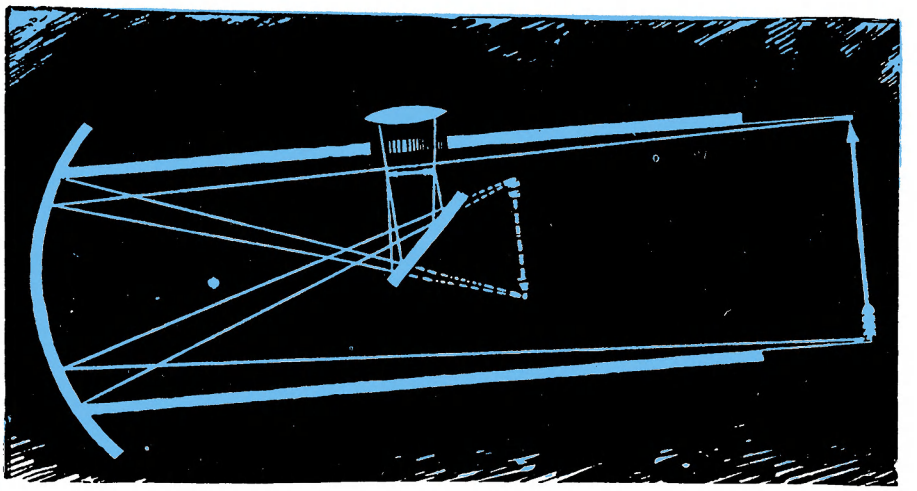


Схема телескопа-рефлектора Ньютона.

Яку ж будову має сконструйований ним дивний інструмент, користуючись яким можна бачити далекі світи у глибинах Всесвіту?

Труба Галілея складається з двох лінз — збирної і розсіювальної. Обидві лінзи вміщені в трубку, яка захищає їх від стороннього світла.

Збирна лінза, звернена до предмета, створює його зменшене зображення. Перш ніж утворюється зображення, промені потрапляють на розсіювальну лінзу, яка змінює їх напрям. Тому предмет здається спостерігачеві більшим і розміщеним вище. Довжину труби можна змінювати залежно від ока спостерігача і віддаленості предмета, який спостерігають. Труба Галілея дуже проста. Її може змайструвати кожний, у кого є дві лінзи — опукла і вгнута. Трубу найкраще зробити складеною з двох труб. Одна труба повинна входити в другу і відносно вільно в ній переміщатися. Це дасть можливість легко змінювати відстань між лінзами.

Через рік після виходу трактату Галілея, у 1611 р., Йоганн Кеплер у своїй книзі з оптики дав опис зорових труб іншої будови, ніж труба Галілея. Труба Кеплера складається з двох опуклих лінз: одна створює обернене дійсне зображення предмета, а друга відіграє роль збільшувального скла, за допомогою якого це зображення розглядають.

Зображення розглядуваного предмета в трубі Кеплера перевернуте, що є хибою порівняно з трубою Галілея. Але вона мала й безсумнівну перевагу, про існування якої сам Кеплер нічого не знав. Її виявили тільки через 30—40 років після винайдення труби. Якщо в тому місці, де утворюється зображення, що його дає перша лінза, вставити шкалу і розглядати зображення разом з шкалою, то це дасть можливість визначити геометричні розміри зображення і обчислити розміри самого предмета.

У 1645 р. Шірль вставив у трубу додаткові лінзи, завдяки чому стало можливим бачити предмети неперевернутими. Лінзу, звернену до предмета, Шірль назвав об'єктивом, а звернену до спостерігача — окуляром.

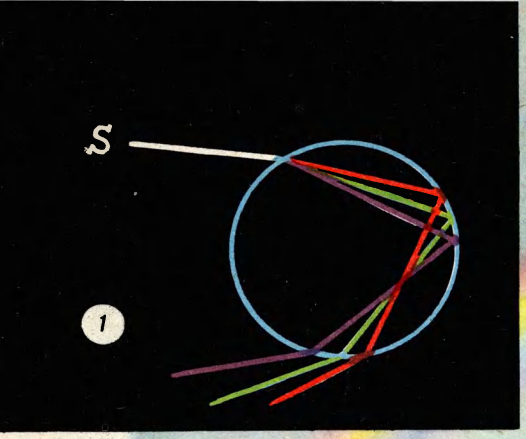
Удосконалену трубу назвали земною зоровою трубою.

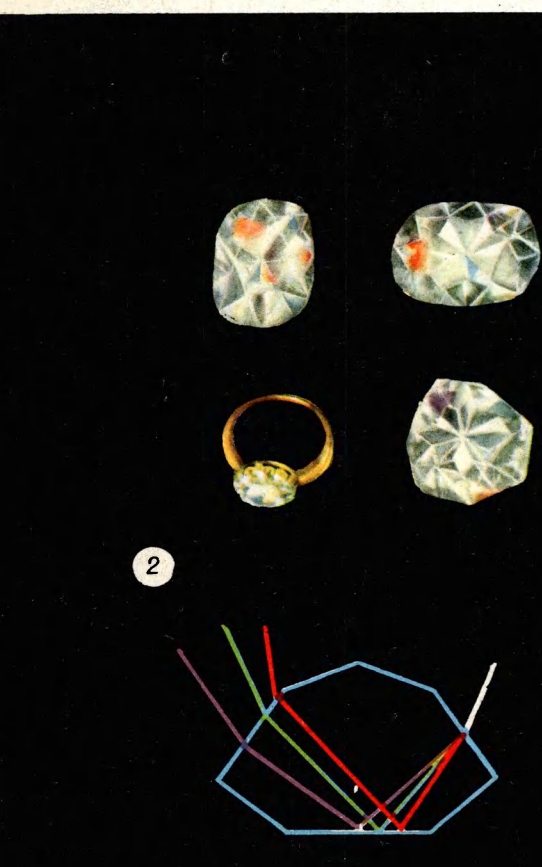
«НОЧОЗОРОВА» ТРУБА ЛОМОНОСОВА

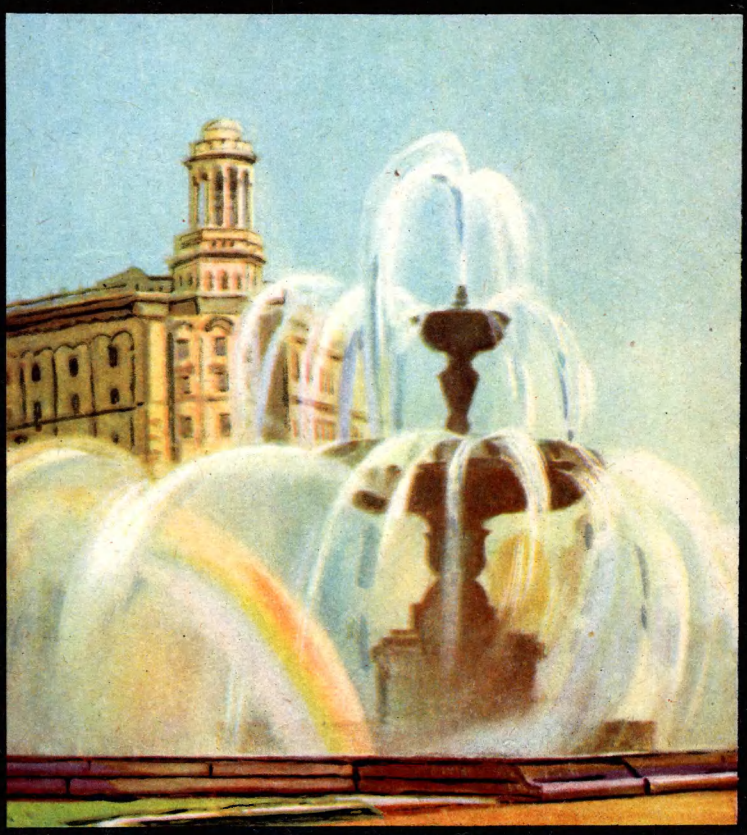
Більш як через сто років, у 1761 р., сталося порівняно рідке і дуже короткочасне небесне явище: планета Венера проходила між Землею і Сонцем, проектуючись на його поверхні.

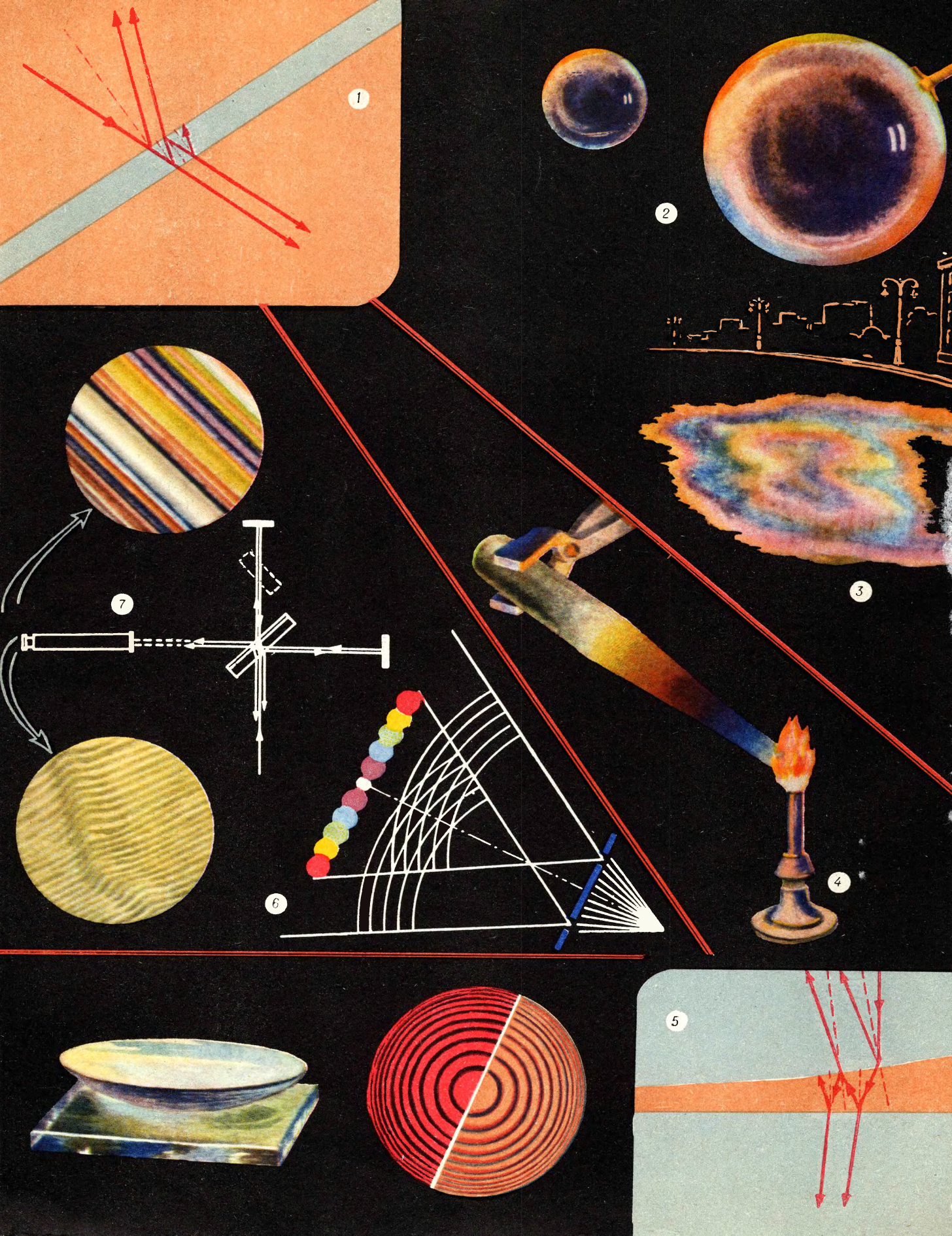
В наперед обчислений час на світлому диску Сонця появився малесенький рухомий диск Венери. Коли він підійшов до краю сонячного диска, навколо нього появився рожевий вінець. М. В. Ломоносов, спостерігаючи це явище за допомогою винайденої ним «ночозорової» труби, зробив висновок, що «Венера оточена значною повітряною атмосферою, такою (коли б не більшою), яка обливається навколо нашої кулі земної». Про це ясно свідчила рожева кайомка навколо темного диска, коли він був близько коло краю Сонця. В цю мить можна було помітити проміння сонячного світла, яке заломлювалось, проходячи крізь атмосферу Венери.

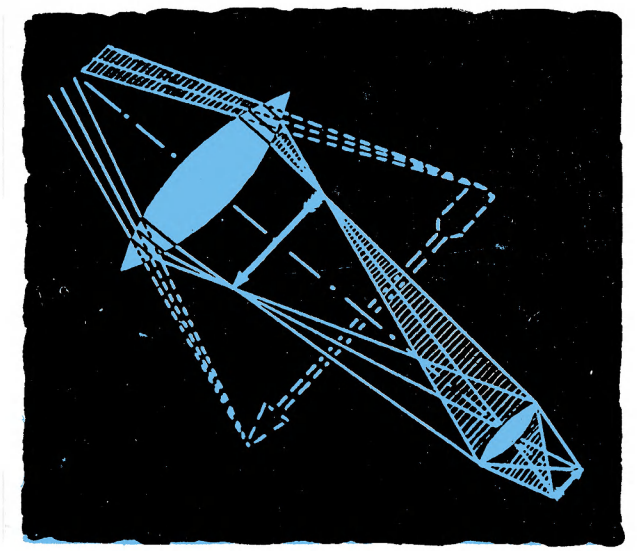
Таблиця 23. Дисперсія світла: *1* — у краплі води; в краплинах дощу (райдуга); у бризках фонтана (райдуга); *2* — у гранчастих кристалах.


S
1


2




1
2
3
4
5
6
7



Принципова схема мікроскопа.

ДЗЕРКАЛЬНИЙ ТЕЛЕСКОП-РЕФЛЕКТОР ІСААКА НЬЮТОНА

Чума, що лютувала в Англії протягом 1664—1667 рр., примусила молодого вченого Ісаака Ньютона переїхати з Лондона додому, в село Вульсторп, недалеко від міста Грентхема. Тут він з захопленням зайнявся експериментальними оптичними дослідженнями. Для цього він придбав найпростіші оптичні прилади: збільшувальні стекла і призми.

Спостерігати предмети крізь стекла з опуклими і вгнутими поверхнями в той час було своєрідною модою.

Але предмети крізь опуклу лінзу здавалися нечіткими, краї були злегка розмиті і забарвлені райдужними кольорами. Причина цього, як думав багато хто, полягала в тому, що поверхня лінз була недосконалої форми і шліфовки. Щоб усунути обидва ці недоліки, Ньютон з властивою йому наполегливістю заходився шукати відповідні форми скла і досконалі методи полірування. В цьому розумінні він добився успіху, але хиби усунути не зумів. Міркуючи над невдачею, він прийшов до висновку, що причина недосконалості сферичних лінз криється в іншому.

Переконаний у тому, що недоліки опуклих і вгнутих лінз принципово усунути неможливо, він почав виготовляти зорові труби, які відрізнялися від поширених у той час труб.

У новій трубі, яку винайшов Ньютон у 1671 р., опуклі лінзи він замінив дзеркалом угнутої форми, яке дає дійсне зображення предмета. На шляху променів, що створюють зображення предмета, було розміщене плоске дзеркало. Після відбиття зображення розглядалось крізь збільшувальне скло. Труба-рефлектор була належно оцінена вченими того часу.

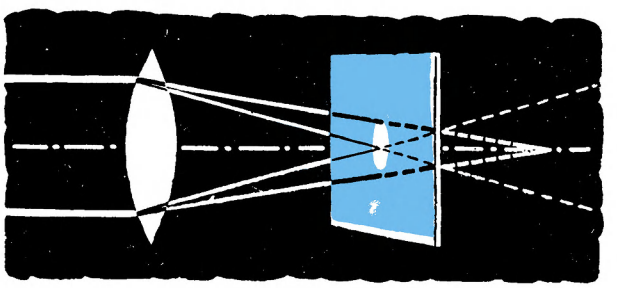
МІКРОСКОП

У той час як Ньютон проводив у рідному селі свої перші експерименти, в Голландії уже немолодий А. Левенгук з цікавістю розглядав усе, що попадалось під руку, крізь збільшувальне скло. Бажання якнайкраще бачити найдрібніші предмети спонукало його створити прилад, який збільшував би видимі розміри предметів.

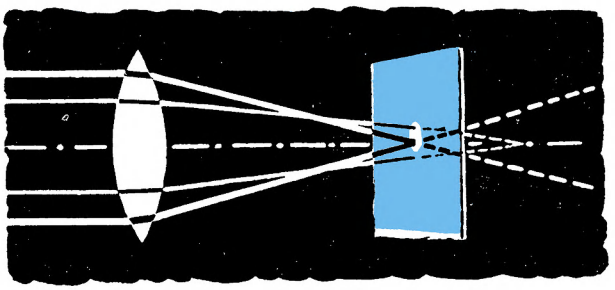
Побудувавши прилад, який збільшував у 160 раз, він виявив у брудній краплині дощової води, взятої з калюжі, живі тільця — інфузорії. Прилад назвали мікроскопом. Так було відкрито шлях у світ невидимого.

Левенгук винайшов мікроскоп у 1665 р., але поширився прилад тільки після того, як його в 1667 р. удосконалив Роберт Гук.

Таблиця 24. Інтерференція світла: *1* — в плоско паралельній пластинці; *2* — в мильній плівці; *3* — в плівці на поверхні води; *4* — в окисній плівці металу; *5* — в повітряному клині між лінзою і плоским склом; поряд — інтерференційна картина в білому і червоному світлі; *6* — схема досліду Юнга; *7*— схема інтерферометра і інтерференційні картини.



а



б

Рис. 6: а) хроматична аберація лінзи, яка виникає внаслідок дисперсії світла; б) сферична аберація, що виникає через кривизну поверхні лінзи.

Таким він лишався довгий час. У 1840 р. мікроскоп значно переробив Амічі. Точну теорію мікроскопа дав Аббе трохи пізніше — у 1863 р.

Теорія мікроскопа дозволила визначити межі можливого збільшення зображення предмета. Виявилось, що збільшити зображення предмета у звичайному світлі більш як у 2500 раз не можна, хоч би яким досконалим оптичним приладом ми при цьому користувалися.

ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА

6 лютого 1672 р. на засіданні Королівського наукового товариства Ньютон зробив повідомлення на тему «Нова теорія світла і кольорів». В цьому повідомленні Ньютон твердив, що «найбільш дивна і чудесна суміш кольорів — біле світло».

У чому ж полягали експерименти, які викликали багато суперечок на засіданні товариства і переконливо доводили твердження Ньютона? Це були експерименти з призмою.

На шляху вузького пучка сонячного світла, що проникало крізь вузьку щілину віконниці, яка закривала вікно, Ньютон ставив тригранну призму. Проектуючи зображення щілини на екрані, він дістав не зображення вузької щілини, а розтягнуту кольорову смугу (спектр). Проте не слід думати, що Ньютон відкрив призматичні спектри. Про них було відомо і до нього. Їх красою милувалося багато людей, а скляні призми продавались для розваги. Але до Ньютона ніхто не твердив, що біле світло містить у собі всі кольори спектра.

Явище розкладання білого світла на складові Ньютон назвав д и с п е р с і є ю (від латинського слова, що означає «розсіяння»). Ньютон вважав, що спектр білого світла складається з семи кольорів, причому довжину кожної ділянки спектра можна точно визначити. Для цього він відкладав на прямій відрізок, що дорівнює подвоєній довжині спектра, і брав довжину подвоєного відрізка за одиницю.

Фіолетовий колір спектра займав половину довжини відрізка. Відстань від правого кінця до синього кольору, як вважав Ньютон, дорівнює $\frac{9}{16}$, до голубого $\frac{3}{5}$, до зеленого $\frac{2}{3}$, до жовтого $\frac{3}{4}$, до оранжевого $\frac{5}{6}$, до червоного $\frac{8}{9}$, до кінця червоного, звичайно, 1. Наведені числа визначають довжини струн, тони яких утворюють мінорну гаму:

$$\frac{1}{2} : \frac{9}{16} : \frac{3}{5} : \frac{2}{3} : \frac{3}{4} : \frac{5}{6} : \frac{8}{9} : 1.$$

Цю довільну шкалу Ньютон вибрав тому, що кольори, взяті в таких відношеннях, так само приємно діють на око, як звуки відповідних частот на вухо.

Сім основних кольорів спектра: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, голубий, синій і фіолетовий, взяті в такій пропорції, при змішуванні дають білий колір. Він обертав пофарбований райдужними кольорами диск, який сприймався оком як білий або, вірніше, сірий, бо фарби здебільшого бувають не зовсім чистих кольорів.

Складові білого світла — промені одного кольору — призма уже більше не розкладає. Таке світло називають м о н о х р о м а т и ч н и м.

При дальшому вивченні явища дисперсії було з'ясовано, що показник заломлення залежить від довжини хвилі світла. Світло коротших довжин хвиль заломлюється призмою більше, ніж довших.

Отже, фізичний зміст показника заломлення вказує на те, що в будь-якому середовищі, в тому числі і в повітрі, швидкість поширення світла залежить від довжини його хвилі. Але в повітрі ця залежність така мала, що нею можна знехтувати і вважати, що в повітрі,

як і у вакуумі, швидкість поширення не залежить від довжини хвилі, тобто дисперсії немає.

Дисперсією світла і пояснюється райдужне забарвлення зображень, які дає збирна лінза. Краї лінзи, подібно до призми, розкладають біле світло на кольорові складові. Тому, наприклад, у збирній лінзі фокус фіолетових променів розміщений ближче до лінзи, ніж фокус червоних.

Цей недолік, властивий збирним лінзам, називають хроматичною аберацією (рис. 6,*а*).

Хроматичну аберацію можна значно зменшити. Для цього збирну лінзу сполучають з лінзою розсіювальною, виготовленою з скла з іншим показником заломлення.

Така складна лінза називається ахроматичною.

Відкриття дисперсії світла дало змогу розгадати не одну загадку природи. Тепер можна пояснити, наприклад, явище райдуги. Райдуга — це дисперсія сонячного світла на краплинах дощу. Спостерігаючи бризки фонтана з боку Сонця або повернувшись спиною до Сонця і розбризкуючи воду, теж можна побачити райдугу.

Райдуга завжди знаходиться проти Сонця, а центр кола, частиною якого є дуга райдуги, лежить на продовженні лінії, проведеної від Сонця через око спостерігача. Радіус цього кола у кутових мірах завжди той самий. Якщо Сонце високо, поява райдуги неможлива. Чим нижче Сонце, тим вище над горизонтом райдуга.

Найбільше світлове відчуття досягається, коли промінь зору утворює кут в 42° з напрямом променів Сонця. Утворюється так звана головна райдуга.

У головній райдузі зовнішній край червоного кольору, а внутрішній — фіолетового. Іноді спостерігається кілька райдуг. Якщо їх дві, то в другій райдузі кольори розміщені в зворотному порядку. В даному разі промінь усередині краплини відбивається двічі і виходить з краплини в напрямі, який утворює з променем Сонця кут в 52°.

Дисперсією пояснюється і багато інших явищ природи.

Льодинки, що утворюються на замерзлому склі, якщо їх освітити, виблискують різнобарвними вогнями. Спостерігати блискотливі візерунки на склі доводилось, мабуть, багатьом. Але зрозуміти суть цього явища люди змогли тільки після відкриття Ньютона. Багатокольорові візерунки — результат заломлення світла в кристаликах льоду.

Гра кольорів у дорогоцінних каменях теж пояснюється дисперсією світла. Алмаз гранують так, щоб світло, що ввійшло через одну грань, вийшло через іншу. Заломлюючись на гранях, білий промінь розкладається на кольорові промені, з яких він складається і які виходять з кристала під різними кутами.

ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА

Навряд чи знайдеться читач, який в дитинстві не розважався б мильними бульбашками. Мильні бульбашки дуже гарні. Вони легко ширяють у повітрі і в сонячному промінні переливаються всіма кольорами райдуги. Кольори не лишаються тими самими, вони весь час змінюються, а коли, нарешті, стають темно-ліловими, бульбашка лопається. На вулицях після дощу в невеликих калюжах або в струмках біля пішохідних доріжок можна бачити, що поверхня води прикрашена райдужними смугами. Так буває, коли вода вкрита дуже тонкою плівкою бензину або масла.

Крила бабок теж переливаються різними кольорами.

На поверхні металу під час гартування утворюються так звані кольори мінливості. За цими кольорами досвідчені ковалі визначають необхідний час гартування.

Яка ж природа цієї різноманітності барв?

Чи спостерігатиметься така сама картина, коли тонку плівку освітлювати не білим, а монохроматичним, наприклад, червоним, світлом? Виявляється, що різноманітність кольорів при цьому освітленні зникає. Плівка в даному разі буває вкрита темними і червоними смугами.

З'ясувати причину утворення темних смуг нам допоможе дослід, який у 1802 р. поставив англійський учений Томас Юнг, прихильник хвильових уявлень про природу світла. Юнг спрямував монохроматичне світло від однієї освітленої щілини на перешкоду з двома малими отворами. Ці отвори правили ніби за самостійні джерела світла. Оскільки ці джерела утворені тією самою світловою хвилею, то природно, що світлові коливання, які поширюються від джерел, знаходитимуться в одній фазі. Такі коливання називають когерентними. Якщо світлові коливання від джерел доходять до якої-небудь точки, то в цій точці відбуватиметься накладання коливань. Результат додавання визначатиметься фазами кожного з коливань, що прийшли в дану

точку. Якщо коливання, що дійшли, будуть в однакових фазах, то, додаючись, вони підсилять одне одного, якщо в різних — то ослаблять.

Якщо фази протилежні, то вони погасять одне одного, і точка буде темною. Геометричне місце точок, до яких коливання дійшли в протилежних фазах, дасть темну лінію.

Фази коливань, що прийшли в дану точку від двох когерентних джерел світла, залежать від різниці відстаней від цих джерел до точки, яку ми розглядаємо. Різницю відстаней від джерел до точки, яку ми розглядаємо, називають різницею ходу. Фази коливань, що додаються, будуть однакові в усіх точках, для яких різниця ходу дорівнює нулю. Такі точки лежать на перпендикулярі до прямої, яка сполучає обидва джерела. Ця пряма завжди буде світлою. Для всіх інших точок різниця ходу буде відмінна від нуля. Якщо на довжині відрізка, що дорівнює різниці ходу, вкладеться парне число півхвиль, то коливання, що прийшли в розглядувану точку, підсилять одне одного, точка буде світлою. Але в тих випадках, коли на довжині відрізка, яка дорівнює різниці ходу, укладається непарне число півхвиль, коливання, що прийшли в дану точку, погасять одне одного, і вона буде темною.

Явище додавання когерентних коливань називають інтерференцією, а картину, що при цьому утворюється, — інтерференційною.

Коли джерела випромінюють монохроматичне світло, то інтерференційна картина являє собою чергування одноколірних і темних смуг.

А коли джерела випромінюють біле світло, то кожний з кольорів, з яких це світло складається, дає свою інтерференційну картину; накладаючись, вони надають райдужного забарвлення всій картині.

Розглянемо тепер, як виникають інтерферуючі хвилі, коли тонку плівку освітлювати світлом від одного джерела.

Коли світловий промінь падає на тонку плівку, то на її першій поверхні відбувається часткове відбиття і заломлення. Заломлений промінь, пройшовши товщу плівки, відбивається від другої її поверхні. Відбившись від другої поверхні, він знову проходить товщу плівки і падає на першу поверхню з внутрішнього боку.

Відбувається друге заломлення, і промінь виходить у середовище крізь поверхню плівки. Промінь, що двічі пройшов товщу плівки, додається до променя, відбитого поверхнею плівки. В результаті додавання цих променів у відбитому світлі утворюється інтерференційна картина. Різниця фаз між коливаннями, що прийшли в дану точку, залежить від різниці ходу, яка дорівнює подвоєній довжині шляху заломленого променя.

Отже, результат інтерференції залежить від товщини плівки, кольору світла, яким вона освітлюється, і від кута його падіння на поверхню плівки.

Явище інтерференції широко використовується в приладах, які називають інтерферометрами. Інтерферометри використовують для найрізноманітніших потреб, наприклад, для контролю чистоти обробки поверхні металу.

ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА

Спостерігаючи тіні, які падають від великих тіл, ми бачимо різку межу між світлом і тінню. Промені від джерела світла прямими лініями ковзають по краях предмета, даючи на екрані обриси межі тіні.

Проходячи крізь отвір у перешкоді, світло на екрані чітко обрисовує форму отвору.

Проте якщо придивитися пильно до межі між світлом і тінню, можна переконатися, що вона ніколи різкою не буває. Тінь, яку відкидають великі тіла, біля самого краю розмита. Правда, розмита вона так мало, що ми цього звичайно не помічаємо.

Проробіть такий дослід.

У темній кімнаті закріпіть на стіні аркуш білого паперу і спрямуйте на нього вузький яскравий пучок світла.

Уведіть у пучок світла біля аркуша звичайну голку. Голка відкине на папір тінь.

Якщо відводити голку від аркуша паперу, тінь перестає бути чіткою. На межі світла і тіні появляться темні і райдужні смуги.

Промені світла ніби обгинають голку, заходячи в область геометричної тіні.

Це явище називається дифракцією світла. Воно полягає в тому, що світло відхиляється від прямолінійного поширення, проходячи вздовж краю предмета або отвору.

Явище дифракції спостерігається особливо виразно тоді, коли геометричні розміри тіла або отвору можна порівняти з довжиною хвилі світла.

При цьому не слід випускати з уваги, що чіткість дифракційної картини залежить і від

того, на якій відстані від предмета знаходиться екран. В цьому легко переконатися на досліді.

Найпростіша дифракційна решітка, являє собою скляну пластинку, на якій на однакових відстанях нанесені тонкі штрихи. Число штрихів може бути від кількох одиниць до кількох тисяч на один сантиметр. Товщина штриха і ширина проміжку між ними називається періодом решітки. Найдосконаліші решітки мають період близько 0,8 мікрона.

Якщо паралельний пучок променів спрямувати, наприклад, перпендикулярно до товщини решітки, то, згідно з уявленнями Френеля, кожний із прозорих проміжків — щілин — стане самостійним джерелом світлових коливань, що поширюються по другий бік решітки в усіх напрямах. Якщо на шляху променів, що пройшли крізь решітку, поставити збирну лінзу, то всі промені, що йдуть від усіх щілин під тим самим кутом до початкового напряму, зберуться у фокусі лінзи. Непрозорими проміжками світло буде затримане.

Якщо ці промені один одного підсилюють, то в фокусі лінзи буде світло. А якщо вони гасять один одного, то буде темрява.

Розглянемо дифракцію від кожної щілини. В даній точці екрана світло буде в тому разі, коли коливання, які створюються хвилями від відповідних точок щілини, збігаються по фазах. Це станеться в напрямі, для якого фронти хвиль знаходитимуться один від одного на відстані цілого числа довжин хвиль світла, яке освітлює решітку.

Положення фронтів хвиль, що йдуть від точок щілини, визначається паралельними прямими, перпендикулярними до паралельних променів. Якщо a — ширина кожного з прозорих проміжків, b — відстань між ними, то $a + b = d$ є періодом решітки. Відстань між фронтами від крайніх точок щілини дорівнюватиме

$$d \cdot \sin \varphi,$$

де φ — кут нахилу фронтів хвиль до площини решітки. Якщо на цій відстані укладатиметься ціле число хвиль або, що те саме, парне число напівхвиль, у фокусі лінзи буде світло.

В даному разі

$$d \cdot \sin \varphi = 2\, m \frac{\lambda}{2},$$

де m — ціле число, λ — довжина хвилі світла.

Якщо кут φ змінити, умова буде порушена і у фокусі лінзи коливання помітно ослаблять одне одного.

Дальше підсилення настане в тому напрямі, що визначається кутом φ, при якому коливання будуть знову в однаковій фазі, що відповідає збільшенню числа m на одиницю, а це в свою чергу відповідатиме умові

$$d \cdot \sin \varphi = 2\,(m + 1)\,\frac{\lambda}{2}.$$

Таким чином, у площині екрана буде чергування світлих і темних смуг. Світлі смуги являтимуть собою зображення джерела світла. Звичайно цим джерелом є вузька освітлена щілина, що розміщена в фокусі збирної лінзи і посилає паралельний пучок світла на решітку.

Явище дифракції дотепно використано для одержання спектрів.

Якщо решітка освітлюється не монохроматичним світлом, а білим, то зображення щілини буде з райдужним забарвленням.

У напрямі, перпендикулярному до площини решітки, всі кольорові зображення щілини накладаються одне на одне; кольори змішуються, і ми бачимо біле зображення щілини.

Вправо і вліво від нього після темних проміжків розміщаються фіолетові зображення щілини, а потім усі інші, аж до червоного. Потім знову йде темний проміжок, після нього — знову фіолетові та кольори, що йдуть за ними.

Дифракційними решітками користуються для дослідження спектра різних джерел світла, наприклад, зір.

Є решітки й іншого типу, які не пропускають, а відбивають світло. Такі решітки являють собою почережні смуги, що правильно відбивають і розсіюють світло.

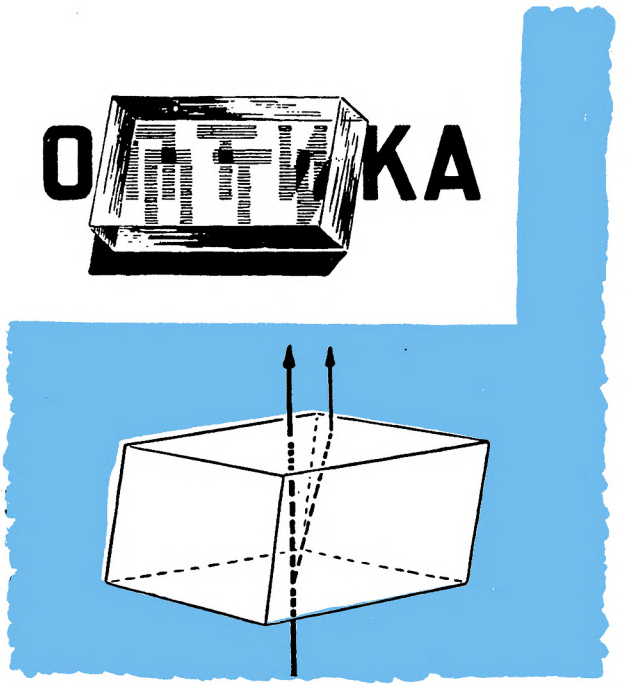
Якщо взяти патефонну пластинку і злегка нахилити її площину до променя світла від електричної лампочки, то можна спостерігати дифракційні спектри. Звукові доріжки в даному разі є смугами відбивної решітки. Аналогічну картину можна спостерігати за допомогою металевої лінійки з міліметровими поділками. Але найпростіше спостерігати дифракцію, якщо, злегка примруживши очі, подивитися на джерело світла.

ПОДВІЙНЕ ПРОМЕНЕЗАЛОМЛЕННЯ СВІТЛА

Якщо розглядати який-небудь предмет крізь кристал вапняного шпату, то він здається роздвоєним.

Світловий промінь, що пройшов крізь кристал, поділяється на два промені.

Це явище, яке називають подвійним променезаломленням, відкрив у 1669 р. датський учений Бартолін.



Подвійне променезаломлення у кристалі.

Спрямовуючи промінь світла в кристал у різних напрямах, Бартолін виявив, що промінь тільки в одному випадку проходить через кристал не роздвоюючись.

Цей напрям у кристалі називають оптичною віссю. Він відповідає напрямові, що сполучає вершини кристала, де сходяться три грані тупими кутами.

Детальне дослідження явища подвійного променезаломлення в кристалі провів Гюйгенс.

Він виявив, що світловий промінь, що падає похило на пластинку, вирізану з кристала, роздвоюється і обидва промені йдуть у різних напрямах.

Один з променів підлягає законові заломлення, його називають звичайним, а другий не підлягає, і тому його називають незвичайним.

Дослідження ходу променів у різних кристалах дали можливість встановити, що властивість подвійного променезаломлення мають турмалін, кварц та інші мінерали. Напрям у кристалі, по якому світло не зазнає подвійного променезаломлення, називається (як ми вже говорили) його оптичною віссю.

А найдивніше явище виявляється тоді, коли на шляху одного з променів, що пройшов крізь кристал, вміщують другий кристал.

При цьому знову спостерігається роздвоєння променя. Обертаючи другий кристал, можна помітити, що при певних положеннях один з променів зникає, ніби гаситься другим кристалом, а яскравість другого стає помітно більшою.

Явище подвійного променезаломлення світла було відоме Ньютонові, який вважав, що світло при проходженні через кристал вапняного шпату зазнає такого впливу цього кристала, при якому корпускули своєрідно орієнтуються в просторі. Значно пізніше Малюс, прихильник корпускулярної точки зору на світло, назвав орієнтацію корпускул поляризацією світла.

Пояснити всі особливості поведінки світлових променів у кристалі, виходячи з корпускулярних уявлень, не було ніякої можливості.

У скрутному становищі опинились і прихильники хвильової теорії, які довгий час вважали, що коливання частинок ефіру відбуваються в напрямі поширення хвилі.

Світлові хвилі, подібно до звукових, вважали поздовжніми.

Щоб пояснити явище поляризації світла, треба було припустити, що коливання частинок ефіру відбуваються перпендикулярно до напряму поширення, тобто що світлові хвилі є поперечними. Після того як було зроблено таке припущення, стало можливим установити різницю між поляризованим і неполяризованим, тобто природним, світлом. У природному (неполяризованому) світлі коливання відбуваються в будь-якому напрямі, перпендикулярному до поширення хвилі.

У поляризованому світлі коливання відбуваються тільки в одному напрямі, перпендикулярному до поширення хвилі.

Відсутність переважного напряму коливань у промені природного світла дає можливість користуватися правилом додавання і розкладання рухів.

Коливання в будь-якому напрямі в кожній точці променя можна розкласти за правилом паралелограма на два заздалегідь вибраних взаємно перпендикулярних напрями.

Після такого розкладу один промінь природного світла поділяється на два промені, поляризовані у взаємно перпендикулярних напрямах.

Попадаючи в кристал вапняного шпату, властивості якого неоднакові в різних напрямах, природний промінь розпадається в кристалі на два поляризованих промені. Коли-

вання одного променя відбуваються в площині, що проходить через оптичну вісь (її називають головною площиною кристала), а коливання другого перпендикулярні до неї.

Саме з цієї причини швидкості поширення променів у кристалі, поляризованих таким чином, різні, і вони заломлюються під різними кутами, тобто відбувається подвійне променезаломлення.

Поляризований промінь, коливання якого відбуваються перпендикулярно до головної площини, є звичайним, а той промінь, коливання якого лежать у головній площині, — незвичайним.

Коли на кристал падає не природний, а поляризований промінь, то в тому разі, якщо коливання в цьому промені збігаються з головною площиною або їй перпендикулярні, з кристала виходить тільки один промінь. При всіх інших положеннях промінь розщеплюється на два: звичайний і незвичайний, — у яких коливання відбуваються у взаємно перпендикулярних площинах.

Явище подвійного променезаломлення виникає в звичайному склі та інших прозорих матеріалах, якщо їх піддати деформації, наприклад, стискати або розтягати.

Цю особливість використовують дуже дотепно в техніці проектування деталей машин. З прозорого матеріалу виготовляють модель деталі, яка, перебуваючи в роботі, деформуватиметься. Модель під навантаженням спеціальними приладами просвічують поляризованим світлом. При цьому на екрані створюється картина розподілу напружень у моделі.

Перетворення природного світла у поляризоване здійснюється за допомогою спеціальних призм. Для того щоб з кристала ісландського шпату виходив тільки один поляризований промінь, Ніколь дотепно скористався явищем повного відбиття світла. Він розрізав кристал паралельно оптичній осі, а потім склеїв його клеєм. Показник заломлення незвичайного променя в шарі клею більший, ніж показник заломлення в кристалі, а показник заломлення звичайного променя — менший. Незвичайний промінь, досягаючи площини розрізу, заломлюється в середовищі оптично більшої густини і проходить через шар клею як через плоско-паралельну пластинку.

Звичайний промінь падає на площину розрізу і цілком відбивається, бо шар клею є середовищем з меншою оптичною густиною, а розріз зроблено так, що кут падіння перевищує граничний.

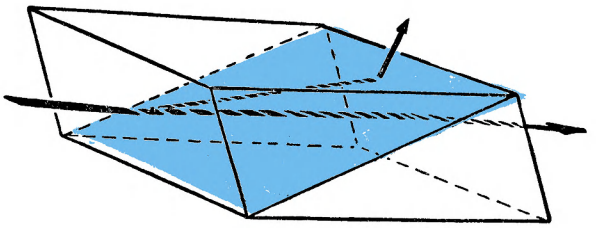


Схема будови призми Ніколя.

Після повного відбиття звичайний промінь вбирається в оправі кристала, а з кристала виходить один поляризований — незвичайний — промінь.

Такий пристрій для здобування поляризованого світла називається **призмою Ніколя**.

Поляризованим буває також світло, відбите від чорного дзеркала, якщо воно падає на поверхню дзеркала під кутом, тангенс якого дорівнює відносному показникові заломлення.

При проходженні поляризованого світла крізь воду його площина поляризації зберігає свій напрям у просторі. Але якщо у воду додати цукру, то площина поляризації світла при виході з шару цукрового розчину буває повернутою відносно напряму поширення на деякий кут. Це явище називають **обертанням площини поляризації**. Властивість цукрового розчину обертати площину поляризації використовується в цукровій промисловості.

Вивчення обертання площини поляризації показало, що кут повороту пропорціональний товщині шару і концентрації розчину. Якщо виміряти кут повороту площини поляризації і товщину шару цукрового розчину, можна обчислити концентрацію цукру в розчині. Прилади, якими можна швидко визначити концентрацію розчину за кутом повороту площини поляризації, називають **поляриметрами**.

НОВА ТЕОРІЯ СВІТЛА

Незважаючи на всі успіхи хвильової механічної теорії світла у другій половині XIX ст., вона була взята під сумнів. Причиною цих сумнівів були, з одного боку, дослідн Фарадея, який відкрив дію магнітного поля на світло, з другого — проведені Максвеллом дослідження зв'язку між електричними і магнітними явищами.

Дослідження привели Максвелла до висновку, що в природі повинні існувати електро-

магнітні хвилі, швидкість поширення яких у безповітряному просторі дорівнює швидкості світла.

Так було дано початок уявленням про електромагнітну природу світла.

У 1831 р. Фарадей відкрив закон електромагнітної індукції, згідно з яким зміна потоку магнітної індукції створює в провіднику, який охоплює потік, електрорушійну силу індукції. Якщо ж провідник замкнути, по ньому піде струм.

Рух електричних зарядів у провіднику відбувається під впливом сил електричного поля.

Електричне поле виникає при зміні магнітного поля. Провідник служить нам тільки для виявлення виникаючого електричного поля. Електричне поле виникає навколо змінного магнітного поля, охоплюючи його кільцем.

Припущення Максвелла про те, що зміни електричного поля спричиняються до виникнення потоку магнітної індукції, було дальшим кроком вперед.

Таким чином, змінне електричне поле, що виникло навколо магнітного, в свою чергу створює змінне магнітне поле, що охоплює електричне, яке знову збуджує електричне, і т. д.

Швидкозмінні електричні і магнітні поля, які поширюються з швидкістю світла, утворюють електромагнітне поле. Електромагнітне поле поширюється у просторі від точки до точки, створюючи електромагнітні хвилі. Електромагнітне поле в кожній точці характеризується напруженістю електричного і магнітного полів. Напруженість електричного і магнітного полів — величини векторні, бо характеризуються не тільки величиною, але й напрямом. Вектори напруженості полів взаємно перпендикулярні і перпендикулярні до напряму поширення. Тому електромагнітна хвиля є поперечною.

З теорії Максвелла випливало, що електромагнітні хвилі виникають тоді, коли зміни напруженості електричного і магнітного полів відбуватимуться дуже швидко. Слушність максвеллівських уявлень експериментально довів Герц.

У 1888 р. Герц добув електромагнітні хвилі, для чого скористався розрядом, який відбувається в іскровому проміжку між двома стержнями, сполученими з індукційною котушкою. Випромінювані таким вібратором хвилі він виявив іншим, аналогічним вібратором, іскровий проміжок якого був сполучений з газорозрядною трубкою.

Щоразу, коли відбувався розряд у вібраторі-випромінювачі, спалахувала газорозрядна трубка, приєднана до вібратора-приймача.

Випромінювач і приймач Герца дуже схожі на звичайну антену для приймання телевізійних передач.

Досліди Герца з електромагнітними хвилями спонукали П. М. Лебедєва шукати шляхи, щоб довести тотожність їх поведінки з поведінкою світла.

У 1895 р. П. М. Лебедєв за допомогою вібраторів створив хвилі 6 *мм* завдовжки.

Вивчаючи їх поведінку, він спостерігав відбиття, заломлення, інтерференцію, поляризацію і подвійне променезаломлення електромагнітних хвиль.

Ці досліди переконливо доводили тотожність природи електромагнітних хвиль і світла.

Іншим переконливим експериментальним доказом електромагнітної природи світла є досліди П. М. Лебедєва по вимірюванню тиску світла.

Проблема вимірювання величини тиску світла виникла ще за часів Ньютона, але успішно розв'язана була тільки П. М. Лебедєвим у 1901 р.

ШКАЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

У природі зустрічаються електромагнітні хвилі найрізноманітніших довжин. Вивчення спектра почалося з його видимої частини, а потім стало поширюватися в бік довгих і коротких хвиль.

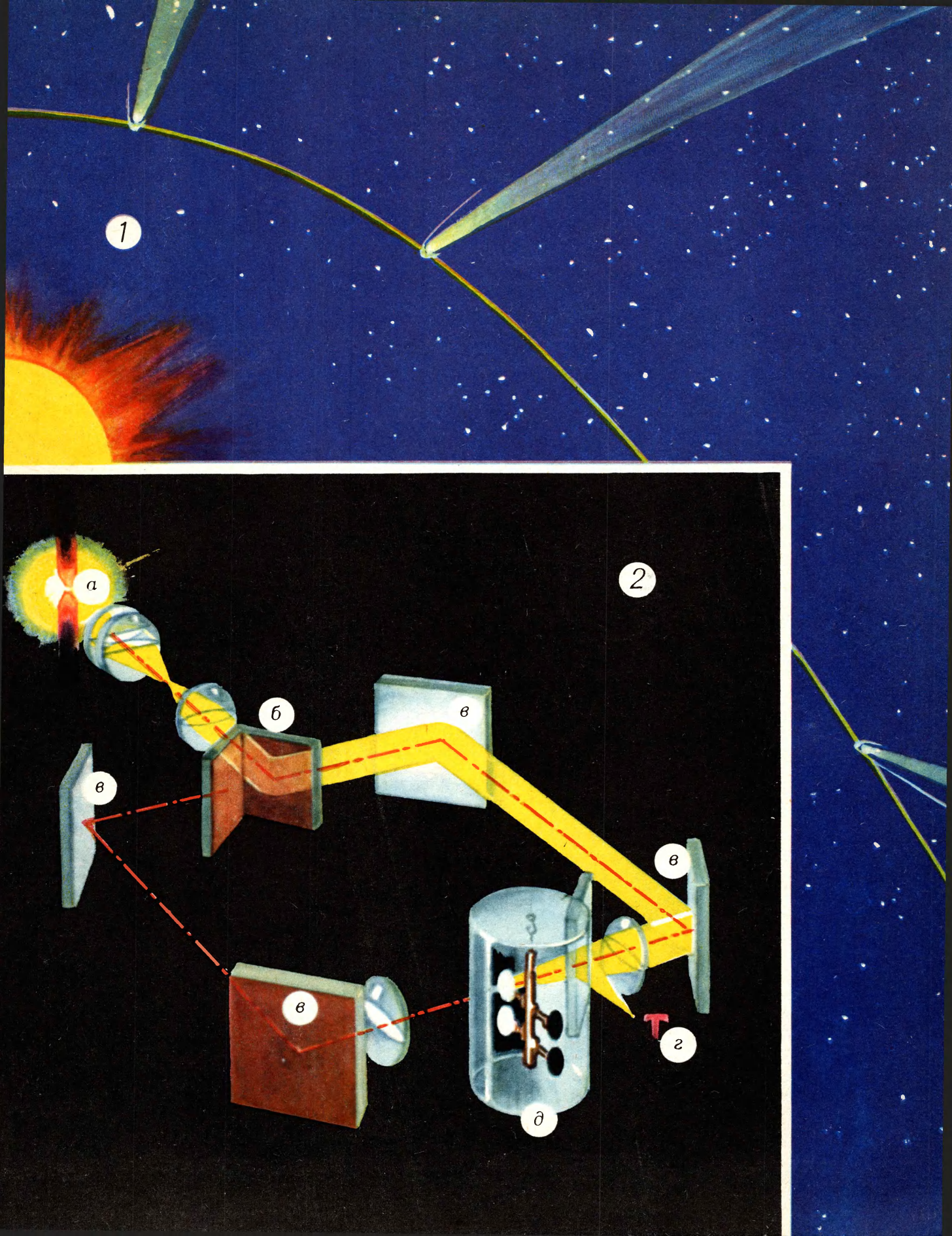
Електромагнітні хвилі, які сприймає око, мають довжину хвилі від 0,7 мікрона (темно-червоний колір) до 0,35 мікрона (темно-фіолетовий). Цей інтервал, звичайно, умовний, він може бути трохи розширений або зменшений з одного або з другого боку.

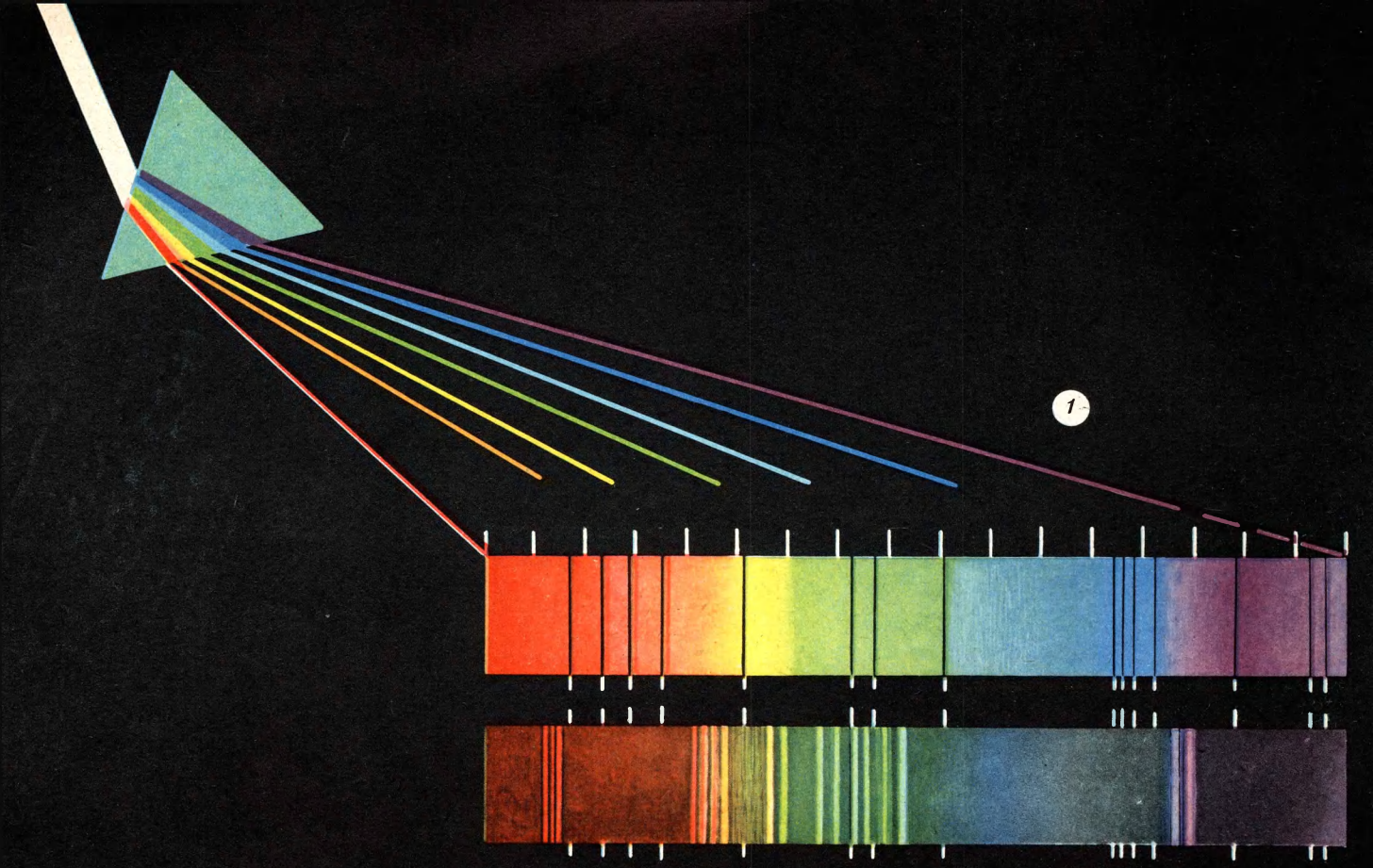
Уся відмінність між невидимими електромагнітними хвилями і світлом полягає тільки в довжині хвилі.

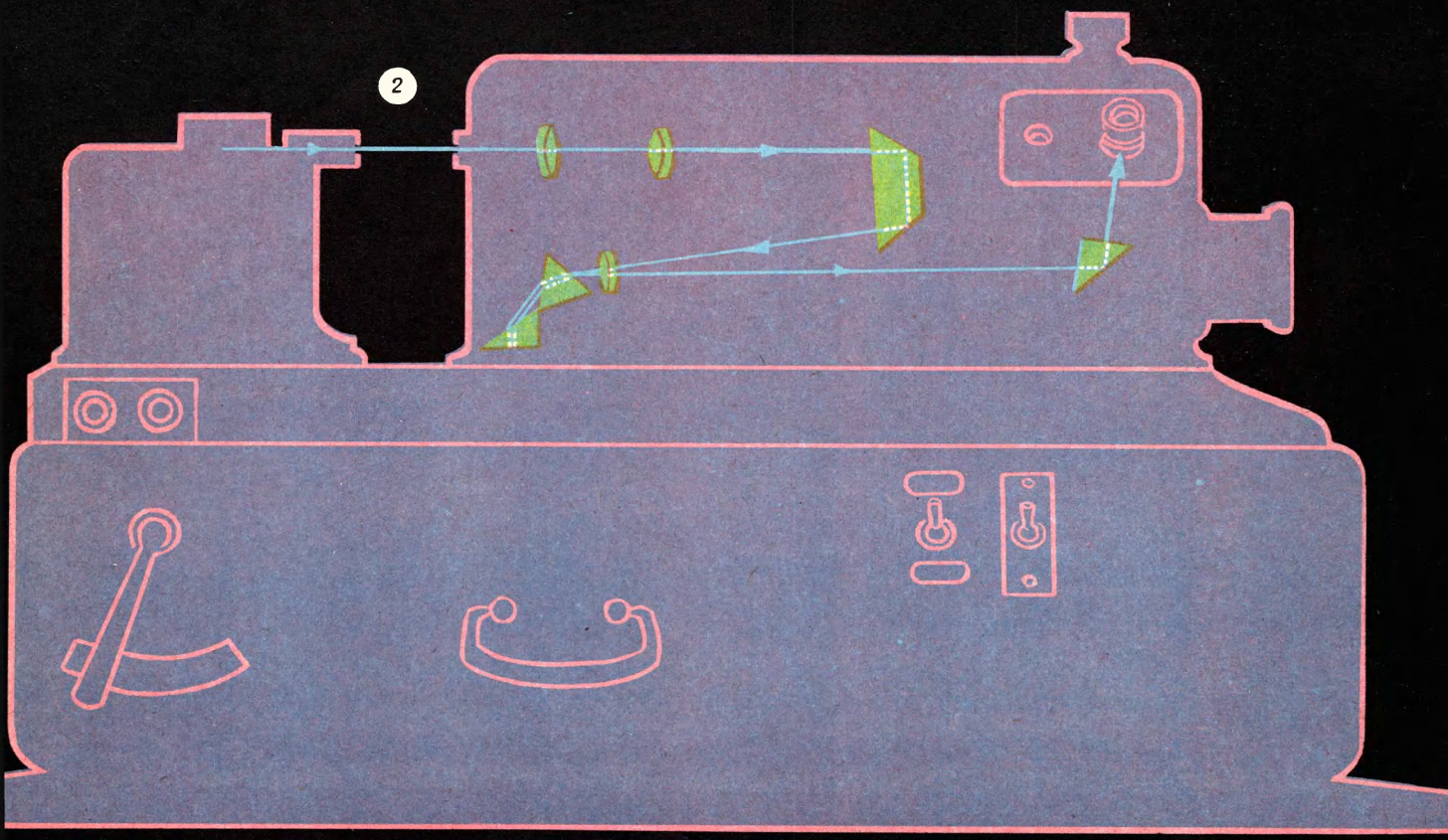
Ділянку видимого світла можна наочно уявити собі, якщо побудувати шкалу електромагнітних хвиль.

За довжинами хвиль, які ще сприймає наше око, лежить область довжин хвиль, які око не сприймає.

Таблиця 25. Тиск світла. *1.* Тиск світла на хвіст комети. *2.* Дослід П. М. Лебедєва з вимірювання величини світлового тиску: *а* — джерело світла — електрична дуга; *б* — рухоме дзеркало, що змінює напрям пучка світла; *в* — нерухомі дзеркала для повороту пучка світла; *г* — термоелемент, на який падає світло, відбите напівпрозорою пластиною; *д* — посудина, в якій міститься підвіска з крильцями, що відбивають або вбирають світло.


1
2
а
б
в
в
в
в
г
д


1


2

Термометр, вміщений у спектр білого світла, в область довжин хвиль, більших за 8000 Å, нагрівається. Це свідчить про існування невидимого «світла».

Досліди з невидимими променями були поставлені Гершелем. Досліджуючи відбиття і заломлення невидимих променів, він установив, що вони поводяться так само, як і видимі. Ці промені були названі інфрачервоними.

На початку XIX ст. були виявлені ультрафіолетові промені.

У пробірці з хлористим сріблом, вміщеній в тій частині спектра, де обриваються фіолетові промені, почалась хімічна реакція. Це діяли невидимі ультрафіолетові промені. Довжина хвилі цих променів коротша, ніж видимих фіолетових.

Дослідження ультрафіолетових променів утруднювалось тим, що вони дуже вбираються склом, яке служить основним матеріалом для виготовлення лінз і призм. Тоді вчені навчилися виготовляти спеціальні сорти стекол. Лінзи і призми з такого скла не вбирають ультрафіолетових променів, довжина хвилі яких не менша від 3000 Å. Вивчення ще коротших хвиль, аж до 1800 Å, можливе з допомогою кварцу. А якщо скористуватися мінералом флюоритом, то вдається дослідити хвилі до 1200 Å завдовжки.

Для ультрафіолетових променів такої короткої довжини хвилі повітря малопрозоре. Особливо їх вбирає кисень. Дослідження дуже коротких хвиль проводять через це в посудинах, з яких викачано повітря.

Ультрафіолетові промені виявляють тепер за допомогою фоточутливої емульсії, в якій під їх впливом відбуваються певні хімічні реакції.

Таким методом удалось дослідити ультрафіолетові промені, довжина хвилі яких близька до 20 Å.

Особливо сприятливі умови для дослідження ультрафіолетової частини сонячного спектра існують на штучних супутниках Землі, рух яких відбувається в умовах дуже розрідженої атмосфери, а також на космічних ракетах.

Ще до того, як добули такі короткі ультрафіолетові промені, Рентген при вивченні електричного розряду в трубці з дуже розрідженим повітрям виявив світіння екрана, вкритого сірчистим цинком. Світіння спостерігалось у момент, коли в трубці відбувався електричний розряд. Вивчаючи причини світіння екрана, Рентген прийшов до висновку, що під час розряду відбувається випромінювання до того часу невідомих променів, які він назвав *X*-променями.

X-промені мають велику проникну здатність. Цупкий картон і папір, дошка і тонка жерсть для них не є перешкодою. Промені проникають крізь предмети з цих матеріалів, а світіння екрана, розміщеного за цими предметами, слабшає зовсім небагато.

Інша картина спостерігається тоді, коли на шляху променів поставити перешкоду з свинцю. Свинець вбирає *X*-промені, для них він непрозорий. Предмети з свинцю відкидають на екран сірчистого цинку різку тінь. Ця властивість споріднює *X*-промені з світлом і свідчить про їх прямолінійне поширення.

Прозорими для *X*-променів виявились і тканини тіла; кістки ж відкидають на екран тінь. Ця обставина дала можливість скористатися *X*-променями в медицині. З їх допомогою стали виявляти вогнища захворювання в легенях, внутрішні переломи кісток і т. п.

Відносно природи *X*-променів, потім названих променями Рентгена, думки дослідників розійшлися: одні вважали, що вони являють собою потік частинок дуже великої енергії, інші вважали їх електромагнітними хвилями, подібними до світла, але з дуже малою довжиною хвилі.

Розв'язання цього важливого питання знайшли при дослідженні променів Рентгена, що проходять через кристали.

Поставивши досліджуваний кристал на шляху променів, вчені виявили, що на фотопластинці, вміщеній позаду кристала, крім центральної плями, появляються симетрично розміщені плями. Положення плям змінюється при заміні одного кристала іншим.

Пояснив походження додаткових плям М. Лауе. Якщо промені Рентгена є хвилі, то, проходячи крізь кристал, де атоми розміщені у вигляді правильної просторової решітки, вони розсіюються атомами. Розсіяні хвилі між собою інтерферують, підсилюючи одна одну в одних напрямах, і створюють додаткові плями на фотопластинці.

Таблиця 26. 1. Дисперсійні спектри. *2.* Зовнішній вигляд і хід променів у стилоскопі (промені на малюнку показані голубими стрілками).

Таким чином, було встановлено хвильовий електромагнітний характер рентгенівських променів. Досліди Лауе дали початок рентгеноструктурному аналізу кристалів.

Положення плям на фотопластинці залежить від відстані між атомами в решітці кристала, тому кожний кристал має властиву йому фотографію. Фотознімки розсіяння рентгенівських променів дають можливість визначити відстань між атомами в кристалах, тобто дістати уявлення про так звану кристалічну решітку. Наприклад, відстань між атомами натрію і хлору в кристалі кухонної солі дорівнює 2,814 Å.

Якщо відома відстань між атомами, то на підставі положень додаткових плям можна визначити довжину хвилі рентгенівських променів, які створюються в розрядних трубках, що називаються рентгенівськими трубками; ця довжина знаходиться в межах від 0,1 Å до довжин хвиль найкоротших ультрафіолетових променів.

Але виявилось, що є промені, довжина хвилі яких менша від найкоротших променів Рентгена. Їх відкрив Беккерель. Виникають ці промені при природному радіоактивному розпаді. Серед трьох видів випромінювання, які супроводять радіоактивний розпад, гамма-випромінювання являє собою електромагнітні хвилі. Довжина цих хвиль залежить від радіоактивної речовини, яка розпадається. Наприклад, торій під час розпаду випромінює гамма-промені з довжиною хвилі в сотні раз меншою, ніж у променів Рентгена.

Інфрачервоні промені, створювані розжареними тілами, мають більшу довжину хвилі тоді, коли їх випромінюють тіла з нижчими температурами. Далі йдуть хвилі, що збуджуються вібраторами спеціальної будови, аж до найдовших хвиль, які застосовуються в радіомовленні. Генератори постійного струму збуджують електромагнітні хвилі, довжина яких нескінченно велика.

Розміщаючи електромагнітні хвилі в порядку зростання їх довжини, ми одержимо суцільний спектр хвиль, назва яких залежить від способу їх збудження. Природа ж їх одна й та сама, а відмінність властивостей зумовлена довжиною хвилі (див. рис. 7 і кольорову таблицю на стор. 464).

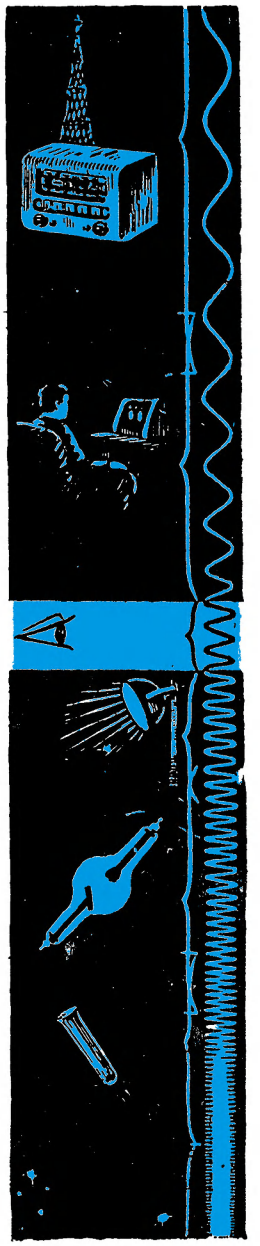


Рис. 7. Шкала електромагнітних коливань.

ЗАБАРВЛЕННЯ ТІЛ У ПРИРОДІ

Ми бачимо предмети забарвленими в різні кольори.

Чому листя на деревах зелене, а квітки можуть бути червоними, оранжевими, жовтими, фіолетовими?

Що таке колір, вчені зрозуміли до того, як розібралися в справжній суті природи світла.

Якщо тіло добре вбирає світло, яке на нього падає, а відбиває погано, то воно чорне, як наприклад, сажа. Якщо ж вбирає погано, а відбиває добре, то воно біле, як сніг, який на яскравому сонці сліпить очі, відбиваючи промені, що на нього падають. Кожне тіло має здатність пропускати, вбирати і відбивати світло тих чи інших кольорів. Від того, які кольори пропускаються, вбираються і відбиваються, залежить забарвлення тіла.

Якщо світло двох кольорів, змішуючись, дає біле світло, то такі кольори називають доповняльними, бо вони доповнюють один одного до білого.

Так, наприклад, синій колір і жовтий — доповняльні, бо при змішуванні вони дають білий колір. Змішування зеленого і червоного теж дає білий колір, так само як і фіолетового і оранжевого.

Розчин хлорофілу в спирті при просвічуванні здається червоним, тому що з білого світла, що крізь нього проходить, він вбирає зелені промені, і, отже, неувібраним лишається світло доповняльного кольору — червоного.

Світло, відбите від розчину хлорофілу, зелене, бо у відбитому світлі немає світла доповняльного кольору.

Говорячи про доповняльні кольори світлових променів, не слід забувати, що йдеться

про змішування світла різних кольорів, а не про змішування фарб.

Змішування фарб — інша справа. Наприклад, синя і жовта фарби при змішуванні дають зелений, а не білий колір.

Це пояснюється тим, що після змішування крупинки синьої фарби вбирають з білого світла, яке її освітлює, всі промені, крім синіх і частково зелених. Крупинки жовтої фарби в цій суміші вбирають з білого світла всі його кольори, крім жовтого і трохи зеленого. Таким чином, відбите світло від такої суміші буде зеленого кольору, бо суміш вбирає промені всіх кольорів, крім зеленого.

Дуже часто ставлять запитання: чому деякі тіла прозорі? Хіба вони не вбирають світла, що крізь них проходить?

Звичайно, вбирають, але в малій кількості і притому світло всіх кольорів в однаковій мірі. Таким чином, в світлі, що пройшло крізь прозорий предмет, не буде порушено співвідношення між різними кольорами.

Якщо прозоре тіло вбирає світло не всіх кольорів в однаковій мірі, то воно дістає відповідне забарвлення. На цьому грунтується виготовлення світлофільтрів. Наприклад, червоний світлофільтр виготовляють із скла, яке менше від інших вбирає червону складову світла.

Тіла, освітлені одноколірним світлом, виглядатимуть інакше, ніж освітлені білим світлом.

Так, тіла, які при освітленні білим світлом зелені, при освітленні їх червоним світлом здаються темними.

Довго люди не могли відповісти на питання, чому небо блакитне, а зорі червоні.

Блакитний колір неба пояснюється розсіянням сонячного світла в повітряній атмосфері Землі.

Розсіяння світла в земній атмосфері, як це показав своїми роботами акад. Л. І. Мандельштам, відбувається завдяки молекулярній будові повітря. Не всі кольори, що входять до складу білого світла, розсіюються повітрям однаково. Виявляється, що найбільше розсіюється світло блакитного кольору. Тому небо і здається блакитним.

Коли сходять і заходять Сонце і Місяць, вони мають мідно-жовтий, а іноді і червоний колір. Це пояснюється тим, що, коли Сонце (або Місяць) знаходиться на горизонті, світлові промені проходять більший шлях крізь товщу атмосфери, ніж коли світило в зеніті. При цьому знов-таки відбувається розсіяння, переважно синьої і блакитної складових сонячного світла. Ось чому світло, що доходить до нас, здається мідно-жовтим і навіть червонуватим.

Наявність у повітрі найдрібніших частинок пилу і вологи, а також туман збільшують розсіяння синьої і блакитної складових, і вони до спостерігача не доходять. В такому разі Сонце стає червоним. Забарвлюються в рожево-червоний колір і хмари — таке є походження зір.

ДЖЕРЕЛА СВІТЛА

Усі тіла в природі при всяких температурах випромінюють електромагнітні хвилі різної довжини. Ці хвилі виносять з собою енергію, кількість якої залежить від температури випромінюючого тіла. Якщо температура тіла не дуже висока, то довгі хвилі виносять енергії більше, ніж короткі. В міру збільшення температури максимум енергії переміщається в бік коротших хвиль.

Залежність розподілу енергії в спектрі випромінювання тіл від температури широко використовують у металургійній промисловості для визначення температури поверхні нагрітого тіла. Вимірюють температуру спеціальними приладами — пірометрами. Зображення розжареної поверхні металу в зоровій трубі суміщають з волоском розжарення, що живиться струмом від батареї. Колір розжареного волоска залежить від величини електричного струму, який через нього проходить.

Коли колір поверхні металу збігається з кольором волоска розжарення, їх температури однакові. Температуру волоска визначають за величиною струму, вимірюваною за допомогою спеціально градуйованого приладу.

Наше око найбільш чутливе до жовто-зеленої частини спектра. Вимірюючи розподіл енергії в спектрі Сонця, вчені виявили, що максимум енергії припадає саме на цю частину спектра. Особливості випромінювання тіл і світлочутливості ока враховують при створенні джерел світла.

Вимірювання дають можливість визначити температуру поверхні Сонця — 6000°.

Тому для створення штучних джерел, світло яких було б близьке до денного, треба досягти температури, що дорівнює температурі поверхні Сонця.

Це створює своєрідні технічні труднощі, бо потрібні матеріали, які б не плавились при 6000°.

Тепер для волосків розжарення широко використовують тугоплавкий метал вольфрам.

ФОТОЕФЕКТ

У 1887 р. Герц виявив, що коли проміжок розрядника освітити ультрафіолетовим світлом, то проскакування іскри помітно полегшується.

Спостереження Герца дали привід до вивчення цього явища. Гальвакс сполучив пластинку досліджуваної речовини з чутливим електроскопом. Коли на пластинку подавали негативний електричний заряд, листочки електроскопа розходились. Коли пластинку освітлювали світлом, листочки електроскопа опадали. Отже, під впливом світла пластинка втрачала свій заряд. Це явище дістало назву фотоелектричного ефекту.

Змінивши методи спостереження, А. Г. Столетов зробив кількісні вимірювання величини фотоструму.

Досліджувана пластинка була пластиною конденсатора. Конденсатор сполучався з електричною батареєю і гальванометром. Коли пластинку опромінювали світлом електричної дуги, гальванометр виявляв у електричному колі струм. Він появлявся тільки в тому разі, коли пластинка була сполучена з негативним полюсом електричної батареї.

Фотоелектричний ефект виявляють майже всі речовини, навіть такі, як лід і вода, якщо їх опромінювати ультрафіолетовими променями.

Найбільше значення довжини хвилі падаючого світла, при якій ще спостерігається фотоефект, називається порогом фотоефекту. Було встановлено, що для кожного металу існує свій поріг. Швидкість, з якою вилітають електрони, починаючи з порога фотоефекту, в міру зменшення довжини хвилі падаючого світла зростає.

Теорію фотоефекту дав у 1905 р. Ейнштейн. В основу теорії були взяті квантові уявлення про природу світла.

Атоми речовини випромінюють і вбирають світло певними порціями, які М. Планк назвав квантами.

Квант енергії світла, що падає на поверхню металу, вбирається. При цьому ввібрана енергія частково витрачається при виході електрона з поверхні металу, а вся інша частина виноситься електроном у вигляді кінетичної енергії:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2},$$

де $h\nu$ — квант енергії увібраного світла, A — енергія, затрачена на роботу виходу, $\frac{mv^2}{2}$ — кінетична енергія електрона, що вилетів.

Якщо квант енергії менший від роботи виходу A, то фотоефект не спостерігається.

Коли електрони під впливом світла покидають поверхню металу, фотоелектричний ефект називають зовнішнім. Фотоелектрони при цьому замикають коло електричної батареї, і в ній проходить струм.

Технічне використання зовнішнього фотоефекту вимагає спеціальної батареї.

Тепер широко використовується внутрішній фотоефект.

Його відкрили при вивченні опору провідників, виготовлених з селену. Електричний опір селену виявився дуже норовливим. Він змінювався щоразу, як тільки змінювалось освітлення поверхні провідника. Це незрозуміле явище спочатку не привернуло уваги дослідників, і його скоро забули. Але потім на нього наткнулися знову. Фізики зрозуміли, що вони мають справу з явищем внутрішнього фотоефекту, тобто з явищем, коли під впливом світла в провіднику збільшується кількість вільних електричних зарядів. Струм у провіднику при цьому зростає, а опір відповідно зменшується.

Речовини, що мають цю властивість, використовують тепер для створення фотоелементів з внутрішнім фотоефектом. Фотоелементи під впливом світла стають джерелами електричної енергії. Тому цілком очевидною є перевага внутрішнього фотоефекту перед зовнішнім.

ХІМІЯ СВІТЛА

Застосування світла у хімії стало особливо поширюватися після того, як були з'ясовані його квантові властивості.

Двохатомна молекула, вбираючи світло, розпадається на атоми. Йодистий водень, наприклад, під впливом світла розпадається на йод і водень.

Реакція йде під впливом фіолетових променів. В звичайних умовах відбувається негайне возз'єднання атомів.

Під впливом світла рослини асимілюють вуглекислоту з повітря. Це одна з найважливіших життєвих реакцій.

У темряві рослини дихають, вбираючи кисень і виділяючи вуглекислоту. При світлі рослини вбирають вуглекислоту, виділяючи кисень. Реакція йде під впливом видимих променів, що вбираються хлорофілом. Вуглекислота, сполучаючись з водою, дає кисень і мурашиний альдегід:

$$CO_2 + H_2O = CH_2O + O_2.$$

Мурашиний альдегід полімеризується. Такими полімерами можуть бути крохмалі.

Зеленим кольором рослини зобов'язані хлорофілові, пристосованому до вбирання енергії сонячного спектра в повітрі.

У глибинах моря, куди найбільше проникають зелені промені, рослини червоного кольору. Червоне забарвлення свідчить про те, що вони вбирають зелені промені Сонця, енергія яких витрачається на фотохімічні перетворення.

ФЛУОРЕСЦЕНЦІЯ І ФОСФОРЕСЦЕНЦІЯ

Світло, проходячи крізь речовину, завжди викликає її світіння. В одних випадках це світіння таке слабке, що його важко виявити, в інших випадках воно виразно проявляється і відмінне від світла, яке його породжує.

Серед світінь такого роду ми розглянемо два.

Перше з них — флуоресценція.

Слово це походить від назви мінералу флюориту (плавиковий шпат), який починає світитися під впливом світла, що на нього падає. Явище флуоресценції припиняється, як тільки припиняється освітлення флуоресціюючого тіла.

Флуоресценцію мають багато які речовини: гас, скло, папір, деякі барвники.

Другий вид світіння тіл — фосфоресценція.

Її особливість полягає в тому, що тіла ще досить довго світяться і після того, як освітлення припинилося.

Свою назву фосфоресценція дістала від фосфору, який при окисленні дає інтенсивне світіння. В лісі світяться гнилі пні. Фосфоресціюють також деякі жучки: їх називають світлячками.

Явище фосфоресценції застосовується в техніці. В лабораторіях і на виробництві є прилади, стрілки і шкали яких світяться в темряві.

Вивчення закономірностей світлових явищ в усій їх різноманітності дає змогу широко застосовувати світло у повсякденній практиці.

ВИСНОВОК

Розглянуті оптичні явища далеко не вичерпують усієї різноманітності проявів світла в природі і техніці.

Світло, за уявленнями нашого часу, — складне електромагнітне явище, в якому проявляються хвильові і корпускулярні властивості електромагнітного поля.

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РАДІО

Щоранку в усіх містах і населених пунктах нашої країни лунає голос репродуктора. Він супроводить нас протягом цілого дня: по радіо ми дізнаємося про останні новини і перевіряємо свої годинники, слухаємо уривки з літературних творів, а в години дозвілля він сповнює кімнату звуками чудесної музики.

Ми так звикли до цього голосу, що часом перестаємо навіть його помічати. Важко уявити собі, що ще якихось 50—60 років тому радіомовлення не існувало і більшості людей здавалося неймовірним, що можна в себе дома слухати концерт з другого кінця світу.

Що ж зумовило такий бурхливий розвиток цієї галузі техніки?

Усім відомо, що радіо винайдено в нашій країні. 7 травня 1895 р. російський фізик Олександр Степанович Попов уперше в світі продемонстрував передачу електричних сигналів на відстань без проводів. Цю подію і вважають днем народження радіо.

На відміну від інших багатьох великих відкриттів, які були визнані тільки через великий час, відкриття О. С. Попова було відразу підхоплене в багатьох країнах світу. Але буржуазно-поміщицька Росія і в даному

випадку виявила себе нездатною використати винахід свого вченого. Власне виробництво радіоапаратури не було налагоджено, і її стали ввозити з-за кордону, здебільшого з Англії, де широко розгорнув свою діяльність інженер і комерсант Марконі.

Що ж являє собою радіо? На яких фізичних принципах воно базується? Щоб відповісти на ці питання, треба думкою повернутися назад, до того часу, коли електротехніка робила свої перші кроки.

РАДІОЛАМПА І ЕЛЕКТРОНИ

У 1883 р. знаменитий американський винахідник Томас Едісон експериментував з пустотною лампою розжарення — прообразом звичайної електричної лампочки. У той час лампи ще не наповнювали інертним газом, а відкачували до якнайбільшого ступеня розрідження, щоб максимально сповільнити окислення і перегоряння волоска розжарення. Під час одного з експериментів у скляний балон лампи впаяли, крім волоска розжарення, металеву пластинку. Зовсім випадково включивши між ними батарею, Едісон помітив, що, коли пластинка приєднана до позитивного полюса батареї, через простір між волоском і пластинкою проходить електричний струм!

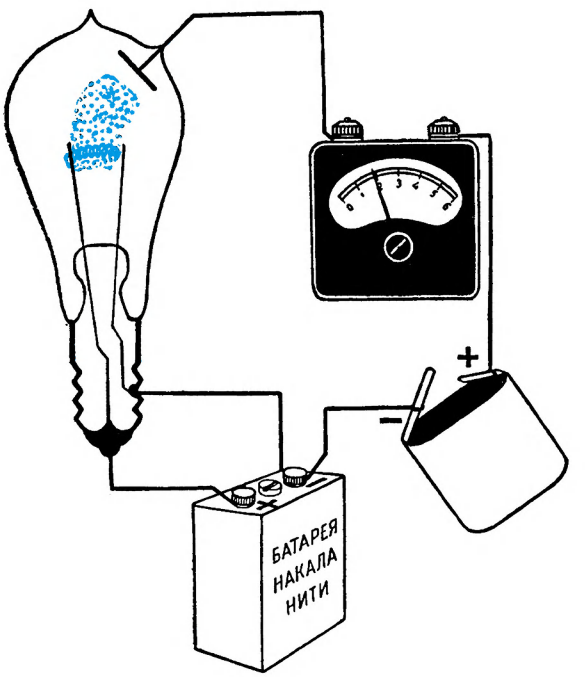


Схема досліду Едісона.

Це було тим більш несподівано, що лампочка була, як ми вже говорили, пустотною, тобто практично все повітря з неї було викачане. Значить, струм проходив через безповітряний простір. Несподіване відкриття дуже схвилювало і зацікавило Едісона, але пояснити його фізичну суть він так і не зміг. Не зміг Едісон і застосувати це відкриття на практиці, хоч на всякий випадок запатентував свій винахід.

Як же пояснює це явище сучасна наука? Чому струм проходить через безповітряний простір?

Кожний учень знає, що речовина складається з атомів. В центрі кожного атома лежить ядро. Його оточує одна або кілька електронних оболонок.

Ядро атома заряджене позитивно, а кожний електрон несе негативний заряд. В цілому атом нейтральний, бо негативний заряд всіх електронів дорівнює позитивному зарядові ядра. Проте електрони не зв'язані з атомом нерозривно — при певних обставинах вони можуть його покидати. Тоді в атомі, що втратив електрон, буде надлишок позитивного заряду.

Але атом може іноді захопити зайвий електрон; тоді сумарний заряд його стане негативним. Атом, що дістав заряд, називається іоном. Іонізація атомів відбувається з різних причин: під впливом температури, під впливом космічних і ультрафіолетових променів, заряджених частинок і т. д.

Особливо легко втрачають електрони атоми металів. Іони становлять кістяк кристалічної решітки; між ними безладно рухаються вільні електрони.

Що ж удержує електрони всередині провідника, чи не можуть вони «з розгону» вискочити з металу? В звичайних умовах — ні. На поверхні металу групуються негативні заряди, бо кожне ядро оточене електронними оболонками, і, таким чином, вся зовнішня поверхня провідника «вкрита» електронами. А через те що негативні заряди взаємно відштовхуються, вільний електрон відкидатиметься назад; крім того, позитивні ядра кристалічної решітки металу теж тягнуть його в глиб провідника.

Але хоч який щільний електронний бар'єр, його все ж можна подолати. Треба тільки збільшити енергію вільних електронів. Зробити це можна, наприклад, нагріваючи провідник. Виявляється, при нагріванні швидкість руху електронів збільшується, зростає запас їх кінетичної енергії і при певній температурі

її уже буває досить, щоб подолати сили відштовхування електронного бар'єра.

Звичайно, не всі електрони мають однакову швидкість; тому при підігріванні з металу спочатку вилітають найбистріші електрони; при дальшому підвищенні температури число бистрих електронів збільшується. Тому чим вища температура, тим більша кількість електронів може покинути провідник.

Випускання електронів, що відбувається при нагріванні провідників, називають термоелектронною емісією. В металах помітна емісія електронів починається при температурі 2000—2500°С.

Але далеко не кожний метал видержує таку температуру, не плавлячись! Одним з найбільш тугоплавких металів є, наприклад, вольфрам: при температурі 2200°С він ще досить міцний. Ось чому Едісонові вдалось виявити електричний струм у звичайній освітлювальній лампочці з вольфрамовим волоском.

Між іншим, перші радіолампи тому і називались «лампи», що вони світили не гірше від освітлювальних. Це й зрозуміло: адже треба було забезпечити добру емісію. Але багато хто знає, що сучасні лампи з скляними балонами зовсім не світять. Що ж, у них гірша емісія? Звичайно, ні, очевидно, навіть краща.

Світіння електронної лампи не перешкоджає емісії, але на розжарення волоска до білого жару йде занадто багато електроенергії, такі лампи неекономічні. Тому дуже важливо було знайти способи підвищення емісійної здатності нагрітого волоска.

Найперша умова підвищення емісії була виконана ніби сама собою. Якби Едісон не викачав повітря з лампи, то він навряд чи помітив би, що від пластинки до волоска йде струм. Справа в тому, що, вириваючись з розжареного металу, електрони відразу почали б стикатися з атомами і молекулами повітря і швидко втрачали б свою енергію. У повітрі електрони не змогли б пролетіти кілька сантиметрів і не дійшли б до пластинки. Тому волосок, який має випускати електрони, вміщують у скляний або металевий балон, з якого викачують повітря — створюють вакуум. Весь газ викачати не можна, але в сучасних радіолампах тиск у кілька мільярдів раз менший від нормального атмосферного. При такому розрідженні електрони поширюються практично без перешкод: з мільйона електронів тільки один може зустрітися з молекулою газу.

Найпростіша радіолампа складається з розжарювального волоска, що випускає електрони, і пластинки, до якої ці електрони можуть доходити. Волосок — це катод, пластинка — анод. Крім того, їх називають електродами.

Є багато способів активування катодів, тобто підвищення їх активності щодо випромінювання електронів. Додавали до вольфраму метали торій, барій, а тепер вкривають оксидами — сполуками окислів деяких металів (барію, стронцію). Усі ці заходи полегшують вихід електронів з металу, і тим самим зменшується витрата електроенергії, бо відпадає необхідність дуже розігрівати катоди.

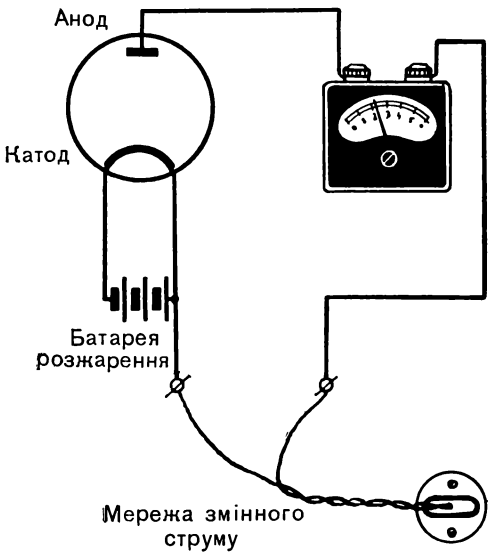
У сучасних лампах з активованими катодами вже не волосок випускає електрони. Для того щоб можна було розігрівати катод змінним струмом, що значно простіше й зручніше, російський вчений проф. А. А. Чернишов запропонував робити так звані підігрівні катоди. Всередині активованої трубки-катода вміщують волосок підігріву, який і розжарюють до червоного змінним струмом. Всі радіолампи тепер роблять тільки з такими активованими підігрівними катодами, крім, правда, деяких типів особливо потужних ламп.

ЩО ДАВ ДІОД РАДІО

Чим же може допомогти радіоприймачеві найпростіша двоелектродна лампа, яку називають звичайно діодом?

Тепер уже багато хто й забув, як були збудовані перші радіоприймачі. Сучасному читачеві навіть важко собі уявити, що можна зробити радіоприймач без єдиної лампи. А ті, хто пам'ятає, який вигляд мали перші приймачі, знають, що неодмінною їх деталлю був детектор, невеликий кристал, що має здатність випрямляти електромагнітні коливання, які до нього надходять. Але прилад цей надзвичайно капризний. Для того щоб він почав працювати, треба тонкою, загостреною на кінці дротинкою знайти на кристалі точку, в якій він має найбільшу чутливість, причому цю точку треба шукати заново щоразу, коли буває потреба ввімкнути приймач.

Проте хоч би які були хиби детекторів, вони були кроком уперед порівняно з першими приймачами О. С. Попова, де роль випрямляча відігравав когерер — невелика трубка, наповнена залізними ошурками. Ще більшим кроком уперед було запровадження в схему приймача діода — скромної двоелектродної лампи, про яку ми вже говорили. Як же працює цей чудовий прилад?



Діод увімкнено в мережу змінного струму.

Якщо ввімкнути діод у коло змінного струму, він пропустить струм тільки в одному напрямі, тобто тільки тоді, коли до катода буде прикладена негативна напруга, а до анода — позитивна. Інакше й не може бути, бо, якщо до анода приєднати негативний полюс батареї, електрони, що вилетіли з катода, не тільки не притягатимуться анодом, а, навпаки, відштовхуватимуться від негативно зарядженого анода і повертатимуться назад на катод.

Тому, якщо подати на діод змінну напругу, він пропускатиме струм тільки тоді, коли напруга проходить позитивні значення. В той час, коли проходитиме негативна півхвиля, діод буде «запертий» і струм по ньому не проходитиме.

Як правило, зміна напруги в колах змінного струму має строго періодичний характер: негативні і позитивні півперіоди йдуть один за одним через рівні проміжки часу.

Характер зміни змінної напруги звичайно виражається синусоїдою — кривою, яка зовнішнім виглядом дуже нагадує хвилю.

Найнаочніше можна показати процеси, що відбуваються в діоді, за допомогою графіка. На рис. 1 зображена синусоїда напруги, яка подається між анодом і катодом діода. Струм проходить через прилад, увімкнений у коло діода, тільки тоді, коли до анода лампи прикладені позитивні значення напруги; тому, як видно з другого графіка, він має пульсуючий характер, але зате йде тільки в одному напрямі, коли електронам відкрита дорога на анод. Ці випрямляючі властивості діода і дали змогу використати його як високочутливий детектор.

Радіохвилі являють собою електромагнітні коливання високої частоти. Кілька сотень тисяч і навіть мільйонів раз на секунду змінюється напруга сигналу, який прийшов через антену в приймач. Якщо цю змінну високочастотну напругу прикласти до діода, він випрямить її і через діод піде пульсуючий, але постійний щодо напряму струм, яким можна привести в дію реле, дзвінок і т. д.

Навіть невелика позитивна напруга «відкриває» діод, бо при достатній емісії навіть без прикладеної напруги через діод проходить, правда, дуже невеликий, початковий струм. Тому досить тільки прикласти невелику позитивну напругу до анода, як потік електронів різко збільшиться.

Завдяки цій властивості діода різко зросли можливості радіо. Головне — збільшилась далекість приймання і значно спростилась і стала досконалішою схема приймача.

Діоди відразу завоювали загальне визнання і швидко витіснили кристалічні детектори, які довгий час застосовувались замість когерерів.

Але справжню революцію в радіотехніці зробила інша лампа, що появилася слідом за діодом. У 1906 р. американець Лі де Форест увів у радіолампу третій електрод. Між катодом і анодом він розмістив пластинку з отворами.

Оскільки отворів треба було робити дуже багато, третій електрод нагадував сітку. Ця назва збереглася за ним і досі, хоч сітки давно втратили свій первісний вигляд і тепер, як правило, схожі на спіралі. Три електроди визначили назву лампи — її стали називати т р і о д о м.

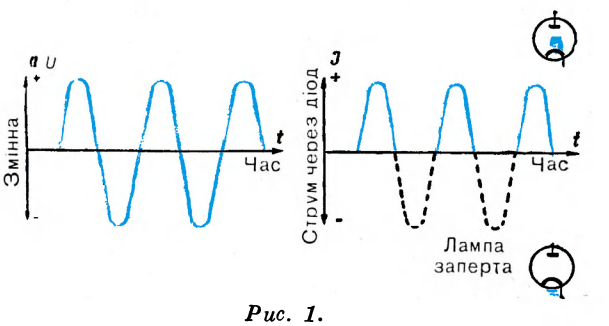


Рис. 1.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ МОЖНА ПІДСИЛИТИ

Чому ж сітка зробила технічну революцію?

По-перше, вона дала можливість підсилювати радіосигнали. Це мало, звичайно, величезне значення, бо тепер слабкі сигнали, слабкі навіть для діода, можна було підсилити в багато сотень разів.

По-друге, була відкрита можливість використати тріод для генерації, тобто створення радіохвиль.

На чому ж грунтуються ці чудові якості сітки?

Як ми вже говорили, сітка розміщається між катодом і анодом. Якщо на неї не подавати ніякої напруги, то електрони вільно пролітатимуть крізь сітку до анода, практично не затримуючись, бо діаметр дротинок сітки дуже малий, а розміщені вони досить рідко. І в найгустішій сітці будуть величезні вікна для електронів, бо розміри електронів надзвичайно малі.

Щоб краще собі це уявити, можна навести таке порівняння. Якщо в думці збільшити електрон до розміру кавуна, то відстані між дротинками сітки відповідатимуть відстаням між планетами сонячної системи.

Можна, звичайно, настільки підвищити негативний заряд сітки, що вона цілком «запре» лампу і струм припиниться зовсім. Така напруга має назву «напруги запирання». Заперти лампу дуже легко, для цього потрібна напруга всього в кілька вольтів.

Ну а якщо подати на сітку позитивну напругу і поступово збільшувати її? Сітка тепер почне притягувати електрони, розганяти їх, причому більшість з них так швидко розганяється, що вони проскакують через сітку «з ходу», а за нею ще сильніше починають притягуватись позитивною напругою анода.

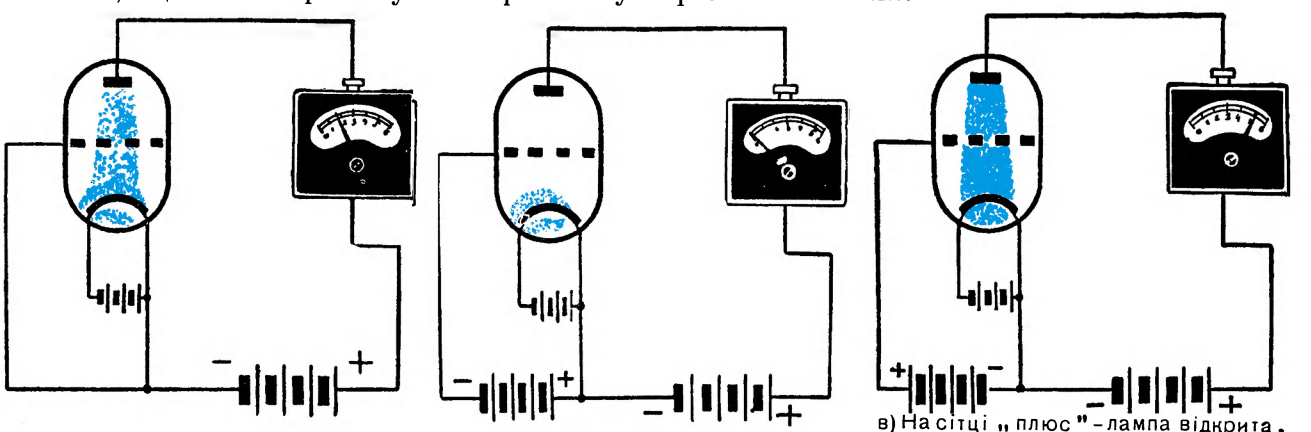
Позитивний заряд сітки допомагає добратися до анода тим електронам, швидкості яких малі і які без прискорювальної дії сітки не долетіли б до анода.

Ті електрони, які «устромляться» прямо в сітку або пролетять дуже близько від її дротинок, притягнуться до сітки і створять побічний сітковий струм, але звичайно він дуже малий порівняно з основним, анодним струмом.

А що станеться, якщо збільшувати позитивну напругу на сітці? Чи буде край зростанню анодного струму? Може, він збільшуватиметься безмежно?

Ні, такого бути не може. Річ у тому, що звичайно на сітку подають невелику негативну напругу. В даному разі, як ми уже знаємо, тільки електрони з дуже високими швидкостями прорвуться до анода, інші вилітатимуть з катода, підлітатимуть до сітки, відштовхуватимуться її негативним зарядом і знову падатимуть на катод. А електронів мільярди мільярдів, вони вилітають з усієї поверхні катода і майже всі повертаються назад.

Тому між катодом і сіткою увесь час знаходиться безліч електронів — висить своєрідна «електронна хмара». Скільки електронів залітає в цю хмару з катода, стільки ж повертається назад на катод. Ця електронна хмара і є резерв вільних електронів, якими так ефективно може керувати сітка. Якщо ми зменшимо негативний заряд сітки, більше електронів прорветься на анод, меншою стане електронна хмара і уже при невеликих позитивних напругах на сітці вона практично зникне зовсім. Тоді струм стане максимальним і більше зростати не зможе.



а) На сітці напруги немає

б) На сітці „мінус" - лампа заперта

в) На сітці „плюс" - лампа відкрита, струм збільшився

Із сказаного вище видно, що сітка виконує роль ідеальної електричної заслінки. Вона керує анодним струмом тріода, причому керує «від краю і до краю». Сітка може цілком заперти лампу, зменшивши анодний струм до нуля, або цілком відкрити її, так би мовити, мобілізувавши всі вільні електрони для створення електричного струму.

Ми вже говорили, що, коли не подавати на сітку позитивних напруг, струм самої сітки практично відсутній. Отже, електрони «марно не витрачаються» і йдуть тільки з катода на анод, тобто на утворення тільки анодного струму. А це в свою чергу означає, що сітка, так радикально керуючи всім анодним струмом лампи, сама практично не споживає ніякої енергії.

Крім цього, лампа з сіткою має ще одну найціннішу властивість — безінерційність. Це значить, що зміна напруги на сітці вмить змінює величину анодного струму, бо швидкість електронів у вакуумі величезна.

Спробуємо тепер подати на сітку змінну напругу, тобто будемо збільшувати і зменшувати з якоюсь частотою (стільки-то раз на секунду) потенціал сітки. Очевидно, тим самим ми ослаблюватимемо або збільшуватимемо анодний струм у такт із змінами напруги на сітці. Якщо на сітку подати напругу, яка змінюється за синусоїдним законом, на аноді появиться копія напруги, поданої на сітку.

Але не точна копія, а значно збільшена. Справа в тому, що невеликої напруги в кілька вольтів досить, щоб «командувати» усім анодним струмом радіолампи. Тому, подавши на сітку невелику змінну напругу, на аноді ми матимемо в кілька разів більшу копію цієї напруги. А це і є підсилення.

За рахунок чого ж відбувається підсилення? Сітка, як ми знаємо, практично не споживає енергії, але зате вона керує енергією анодної батареї: з допомогою невеликої змінної напруги сітка керує всім потоком електронів, «розкачує» потужний анодний струм, перетворюючи енергію анодної батареї в енергію коливальної, змінної напруги, яка точно повторює форму напруги на сітці.

Те, що тріод виявився здатним підсилювати змінну напругу, зробило його незмірно цінніщим і важливішим від діода. Тепер найслабший сигнал перед подачею на детектор міг бути підсилений одним, а якщо треба — двома, трьома і більше тріодами. Це різко збільшило дальність радіозв'язку. Найслабші сигнали, які не справили б ніякого враження на коегерер і не були б помічені навіть діодом, перетворюються підсилювальними тріодами в сильні, упевнені сигнали. Це й зрозуміло, бо увімкнені одна за одною лампи можуть підсилити сигнали у сотні тисяч і навіть мільйони раз.

НОВІ ЛАМПИ — НОВІ МОЖЛИВОСТІ

Але цим не обмежився переможний хід тріода.

Як ми вже говорили, було відкрито ще одну найціннішу властивість триелектродної лампи: виявилося, що з її допомогою можна генерувати радіохвилі. Докладніше ми поговоримо про це трохи далі.

Лампові генератори швидко витіснили всі інші, раніш поширені прилади, бо були простіші, надійніші від них і легко дозволяли здійснювати передачу по радіо мови і музики. Лампові передавачі дають можливість легко перестроюватися на яку завгодно довжину хвилі і не заважають один одному.

З винайденням генераторів на лампах радіо вийшло на великий, широкий шлях свого розвитку. Тепер на озброєнні радіотехніки стояли діоди і тріоди. Безперервно підвищувались їх підсилювальні якості і створювались спеціальні генераторні лампи.

У 1919 р. в радіолабораторії Нижнього Новгорода один з основоположників радіотехніки М. А. Бонч-Бруєвич створив першу в світі потужну електронну генераторну лампу з водяним охолодженням.

Того ж року було проведено перші пробні передачі мови і музики, а через рік відбулась рекордна щодо дальності передача — з Москви було передано концерт для Берліна. Німці дуже добре чули передачу, але відповісти таким самим концертом не могли: у Німеччині на той час радіотехніка була дуже мало розвинута.

Потужності радянських передавальних центрів безперервно нарощувались і увінчались створенням у 1933 р. найбільшої в світі радіостанції ім. Комінтерна потужністю 500 *квт*.

Коли розкрились усі можливості тріода, в історії радіо почався новий період, багатий на чудові досягнення. Винахідники, інженери, вчені безперервно вдосконалювали електронну лампу, поліпшували її якості і розширяли сферу застосування. Появились лампи з двома, трьома, чотирма, п'ятьма і навіть шістьма сітками. Ці лампи почали виконувати найскладніші завдання щодо керування і перетворення електричних коливань.

Що ж дала, наприклад, друга сітка?

Освоєння коротких хвиль вимагало підсилення напруг високої частоти. Підсилювачі на тріодах, що використовувалися для цієї мети, працювали нестійко і не забезпечували надійного підсилювання. Дослідження показали, що причина полягає в наявності значної ємності між катодом і анодом. Справа в тому, що будь-які дві пластини, розділені проміжком, утворюють конденсатор. Між двома провідниками або між пластиною і провідником теж існує ємність, а ємність (конденсатор), не пропускаючи постійного струму, вільно пропускає змінний струм, особливо високої частоти.

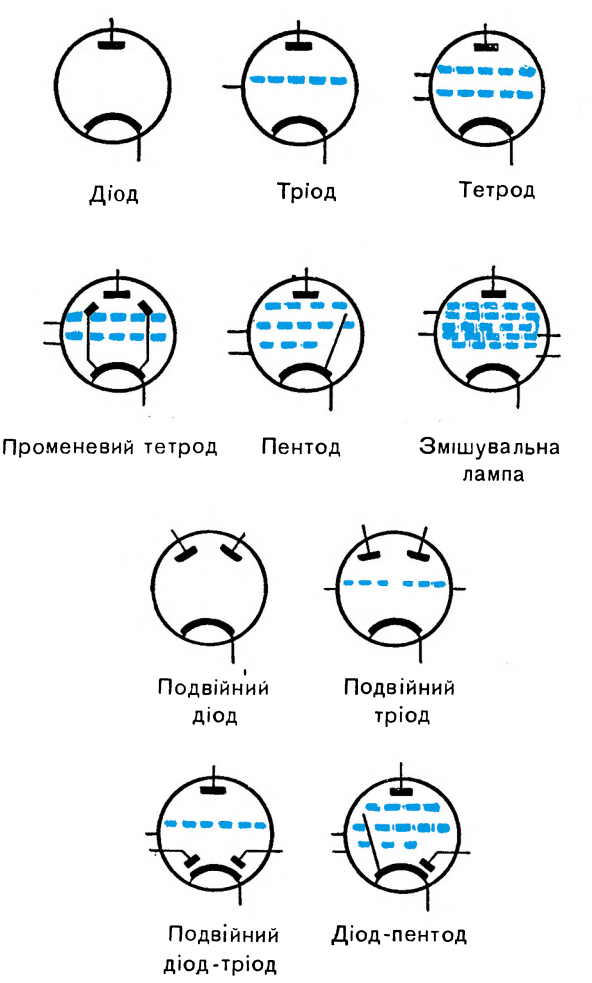
Тому при підсиленні високих частот ємність між сіткою і анодом починала діяти шкідливо. Частина підсиленої напруги з анода через цю ємність іде назад на сітку, що збільшує величину сигналу на ній. Це в свою чергу приводить до збільшення анодної напруги, а значить, збільшується і частка напруги, що йде назад на сітку, і т. д.

В результаті робота лампи стає нестійкою, виникає самозбудження, лампа починає працювати як генератор, і підсилення припиняється.

Виключити шкідливу дію цієї ємності удалось, умістивши між першою керуючою сіткою і анодом ще одну, так звану екрануючу сітку. Ця додаткова сітка екранує, захищає основну сітку від нацходження з анода підсилених високочастотних коливань. Практично її захисна дія зводиться до різкого зменшення дії ємності між сіткою і анодом.

Оскільки в такій лампі стало чотири електроди, вона дістала назву тетрод. Але й вона виявилась не вільною від недоліків. Вияснилось, що екрануюча сітка занадто ретельно допомагає розганяти електрони, і вони з такою силою ударяються в анод, що вибивають з оболонок атомів анода так звані вторинні електрони. Частина цих електронів притягується назад анодом, а частина долітає до екрануючої сітки і створює зворотний струм. Цей струм зворотного напряму називають динатронним струмом, бо явище вибивання вторинних електронів має назву динатронного ефекту.

Динатронний ефект теж приводить до самозбудження підсилювача або до великих спотворень сигналу, тому тетрод «царював» недовго. Між екрануючою сіткою і анодом вмістили ще одну сітку — захисну, або протидинатронну. Роль її ясна: не пускати вторинні електрони на екрануючу сітку.



Схеми багатосіткових і комбінованих ламп.

Але третя сітка не тільки запобігає наслідкам динатронного ефекту. Вона так само впливає на тетрод, як екрануюча сітка на тріод: зменшується ємність між керуючою сіткою і анодом і збільшується підсилення лампи, яке, як правило, стає в 10—30 раз більшим, ніж у тріода. Ця лампа, в якій тепер уже було п'ять електродів, дістала назву пентод.

Пентод виявився ідеальною лампою для підсилення високочастотних сигналів.

Введення четвертої, п'ятої і шостої сіток було викликане появою супергетеродинного методу приймання, мова про який піде далі. Ці лампи були покликані змішувати і перетворювати частоти, через що вони і дістали назву змішувачів і перетворювачів. Крім того, через велику кількість сіток їх часто називають багатоелектродними.

Радіолампи вдосконалювались не тільки шляхом добавляння сіток. Появились так звані комбіновані лампи. В одному скляному балоні і часто над одним катодом розміщалось дві, а то і три лампи, наприклад, два діоди і тріод або два тріоди і т. д.

Але комбіновані лампи, хоч і мають багато електродів, істотно відрізняються від багатоелектродних.

По-перше, для роботи окремих частин лампи використовуються різні потоки електронів: сітка кожного тріода, наприклад, керує своїм електронним потоком. Інша річ у багатоелектродних лампах: там один електронний потік проходить через усі сітки, і на нього діють усі електроди.

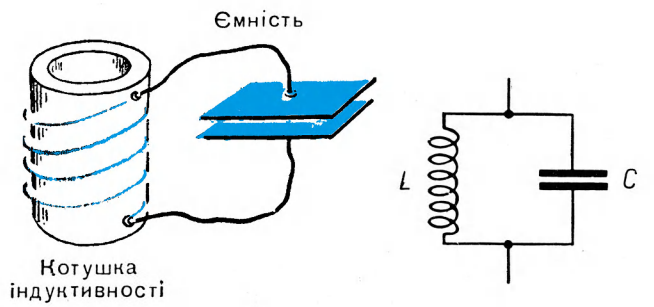
Комбіновані лампи дуже зручні і практичні, бо різко зменшують необхідну кількість ламп. При цьому скорочується число катодів і, отже, витрата струму на їх нагрівання. В період захоплення такими конструкціями п'ятишестиламповий приймач міг мати всього два балони, дві видимі лампи.

ЧОМУ НА ХВИЛЮ МОЖНА НАСТРОЇТИСЬ

Усі знають, що на антену приймача можна піймати яку завгодно станцію, досить тільки настроїти приймач на потрібну довжину хвилі.

Що ж таке радіохвилі? Чому на них можна настроюватися?

Електромагнітні коливання можна викликати в «контурі», тобто замкненому електричному колі, що складається з котушки індуктивності і конденсатора. Котушка, або просто індуктивність, — це скручений у спіраль провід, а конденсатор — близько розміщені металеві пластини, на яких можна збирати заряди і нагромаджувати, таким чином, електричну енергію.



Електричний коливальний контур.

Якщо приєднати батарею до пластин конденсатора, то конденсатор почне заряджатися, на ньому появляться електричні заряди. Пластина, сполучена з негативним полюсом, зарядиться негативно, сполучена з позитивним — позитивно.

На пластинах появиться електрична напруга, яка зростатиме, поки не зрівняється з напругою батареї. Тоді конденсатор буде зарядженим до краю, відповідно до його електричної ємності, тобто здатності запасати електричні заряди. Чим більша ємність, тим більше зарядів при даній напрузі «ввійде» в конденсатор, тим більша електрична енергія зосередиться в електричному полі між пластинами зарядженого конденсатора. Якщо вимкнути батарею, запасена енергія залишиться в конденсаторі.

Якщо тепер заряджений конденсатор приєднати до кінців обмотки котушки індуктивності, то він почне віддавати запасену енергію, розряджатиметься через котушку. По котушці і по проводах піде розрядний струм конденсатора.

Відомо, що навколо всякого провідника з електричним струмом виникає магнітне поле. Виникає воно і навколо котушки з струмом. Електрична енергія конденсатора перетворюється в котушці в магнітну енергію електричного струму. В той момент, коли конденсатор розрядиться, магнітне поле досягає найбільшого значення і починає убувати, пронизуючи витки котушки.

Енергія, нагромаджена магнітним полем, звичайно, не може зникнути безслідно, вона повинна перейти в інший вид енергії.

Справді, згідно з законом магнітної індукції, відкритим Фарадеєм, магнітне поле котушки, зменшуючись, створює в ній електрорушійну силу, яка не дає зникнути полю.

Ця електрорушійна сила створює струм, який починає знову заряджати конденсатор. Але цей зарядний струм ітиме вже в зворотному напрямі і через те перезарядить конденсатор, ніби «помінявши місцями» його пластини: позитивна зарядиться негативно і навпаки. Конденсатор зарядився і знову почне розряджатися на котушку, але розрядний струм в електричному колі тепер ітиме в іншому напрямі. Навколо котушки виникне магнітне поле, і процес повториться в тій самій послідовності.

Електричне коло, що складається з котушки індуктивності і конденсатора, називається замкненим коливальним контуром. В ньому відбувається періодичне переміщення електричних зарядів, тобто проходження струму, в протилежних напрямах. Це і є електричні коливання контура.

Подібно до того, як поступово затухають коливання маятника, так і в контурі після приєднання зарядженого конденсатора коливання через деякий час припиняться, затухнуть. Основна причина втрат — це електричний опір проводів, з яких зроблено контур. Частина енергії при кожному коливанні затрачається на подолання цього опору і перетворюється в тепло. Тому з кожним новим коливанням запас енергії контура зменшується і коливання затухають.

Від чого ж залежить частота або період електричних коливань? Період коливання маятника зв'язаний з його довжиною. Чим більша довжина, тим більший період, тим повільніше коливається маятник. В ходиках період дорівнює 0,5 сек., а найбільший маятник, підвішений під стометровим куполом Ісаакіївського собору в Ленінграді, робить повне коливання за 20 сек.

В електричному контурі тривалість періоду залежить від величини ємності конденсатора та індуктивності котушки. Чим менше число витків котушки, тим менше при даному діаметрі її індуктивність, тим швидше змінюється сила струму в контурі. Чим менша ємність конденсатора, тим менше часу потрібно на процес його розряджання і заряджання. Тому, чим менші ємність і індуктивність, тим менший період коливання, менша довжина хвилі і більша частота коливань, тим більше число разів на секунду встигає перезарядитися конденсатор. Змінюючи величину ємності або індуктивності, легко «настроїти» контур на яку завгодно частоту. Так і роблять у приймачах: обертаючи ручку настроювання, ми, звичайно, змінюємо ємність конденсатора, а значить, і частоту власних коливань контура.

Коливання в електричному контурі відбуваються в багато разів швидше, ніж коливається найкоротший маятник. Конденсатор перезаряджається за тисячні і мільйонні частини секунди. Це значить, що періоди електричних коливань теж малі, а частота коливань становить тисячі і мільйони раз на секунду.

Для вимірювання частоти коливань існує спеціальна одиниця — герц (скорочено *гц*). Один герц означає одне коливання на секунду.

Оскільки в радіотехніці доводиться мати справу з тисячами і мільйонами герців, стали застосовувати більші одиниці вимірювання частоти: кілогерц *(кгц)* — тисяча герців і мегагерц *(мгц)* — мільйон герців. Відповідно до цього для вимірювання часу і періодів коливань користуються і меншими одиницями часу: мілісекундою *(мсек)* — тисячною частиною і мікросекундою *(мксек)* — мільйонною частиною секунди.

Властивості коливального контура широко використовують у радіотехніці, бо здебільшого тільки з його допомогою можна здобути коливання високих частот, які відповідають довжинам хвиль, що використовуються в радіо.

Але електричний контур має ще одну важливу властивість. Він дає можливість використати так зване явище резонансу і здійснювати селекцію, тобто розділення і виділення різних частот. Це і дає нам можливість настроюватися на певну хвилю і виділяти потрібну станцію серед величезної кількості інших.

В електричний контур можна вводити енергію іззовні. Для цього треба впливати на контур зовнішньою періодичною силою, тобто змінною електрорушійною силою якоїсь певної частоти. Такі коливання, зумовлені зовнішньою силою, мають назву вимушених коливань.

Якщо частота електрорушійної сили, що вводиться в контур, дорівнює власній частоті коливань контура, виникає явище резонансу — амплітуда коливань досягає найбільшої величини. Це зростання амплітуди коливань не потребує збільшення амплітуди підводжуваного коливання, треба тільки, щоб частота підводжуваних коливань дорівнювала власній частоті контура.

У чому фізична суть цього явища?

Спробуємо це пояснити спочатку на прикладі маятника. Що потрібно, щоб маятник не зупинявся? Очевидно, підштовхувати його, причому підштовхувати в такт його власним коливанням. Навіть якщо кожний поштовх буде слабким, якщо ми передаватимемо маятникові за один поштовх невелику порцію енергії, однаково ми зможемо дуже розгойдати маятник.

Так само можна розгойдати і електричний контур. Для цього треба подавати в нього енергію також у такт і тієї самої частоти. Контур «розгойдуватиметься» тільки від тієї частоти, яка відповідає його власній, тобто з електричних коливань різних частот він ви-

ділить потрібну, свою, бо тільки вона одна викличе явище резонансу, і з малих «підштовхувань» контур збере, нагромадить значну енергію.

Звичайно, контур не зможе безконечно збирати «поштовхи» і збільшувати амплітуду коливань. Чим більша амплітуда напруги на контурі, тим більша амплітуда струму, тим більші втрати, тим більше енергії розсіюється у вигляді тепла. Звичайно, різні контури дають різні втрати на одній і тій самій частоті, а значить, і різну максимальну амплітуду.

Не слід думати, що резонанс контура настає точно на одній частоті. Кожний, мабуть, знає, як іноді в приймачі чути зразу дві станції. Це значить, що контур погано «розділяє» дві станції, що обидві близькі частоти одночасно проходять через контур і обидві збуджують досить велику амплітуду.

Справді, кожний контур різко посилює не одну, а цілу «смугу» частот, причому чим більша його добротність, тим вужча смуга частот. Якщо, наприклад, у паспорті приймача записано, що він має смугу пропускання 6 *кгц*, а ми настроїлись на довгохвильовому діапазоні на хвилю 1500 *м* (200 *кгц*), то ми приймемо всі частоти від 197 до 203 *кгц*.

Між іншим, радіомовні станції мають, як правило, між собою «відстань» в 9—10 *кгц*. Тому смугу пропускання контурів приймачів роблять трохи вужчою, щоб була можливість відстроюватися від сусідніх станцій.

Ясно уявивши собі основні властивості електричних контурів і зрозумівши фізичні процеси, що відбуваються в електронній радіолампі, можна простежити шлях сигналів у найпростішому радіоприймачі.

ПРИЙМАЧ І ПЕРЕДАВАЧ

Ось сигнал надійшов в антену. Антена хоч, як правило, і складається з куска проводу, але принципово це дуже широкосмуговий контур — вона приймає сигнали кількох діапазонів, але зате і резонансні її властивості виражені слабко, добротність її низька. В основному антена служить тільки для вловлювання енергії електромагнітних хвиль.

Високочастотне поле радіосигналу наводить в антені змінні струми високої частоти, які потім подаються на вхідний контур. Як правило, це контур високої добротності і, отже, вузької смуги. З хаосу частот він виділяє цю єдину вузьку смугу частот.

Енергія сигналів, виділених вхідним контуром, а отже, і напруга, що на ньому виникла, дуже малі. Але подана на сітку першої підсилювальної лампи і в кілька сотень разів підсилена, вона появиться на контурі, увімкненому в анодне коло і настроєному на ту саму частоту. З цього контура коливання можна подати на сітку другого тріода і підсилювати сигнал ще і ще. Пройшовши кілька таких «каскадів підсилення високої частоти», коливання стають у тисячі і мільйони раз сильнішими, ніж були в приймальній антені.

Тепер їх можна подати на детектор. Детекторна лампа випрямить змінну напругу, через неї піде пульсуючий струм постійного напряму, поява якого і просигналізує про те, що через контури приймача пройшов сигнал тієї частоти, на яку настроєно приймач.

Настроювання в переважній більшості випадків здійснюється зміною ємності конденсатора, що входить у контур. Коли каскадів підсилення високої частоти, а значить, і контурів кілька, всі ємності треба міняти зразу і на однакову величину. Для цього рухомі пластини змінних конденсаторів кожного контура насаджують на спільну вісь і повертають одночасно однією ручкою настроювання.

Так працюють найпростіші приймачі «прямого підсилення», які довгий час були основними і єдиними радіомовними приймачами. Своєю назвою вони зобов'язані тій обставині, що високочастотний сигнал підсилюється прямо, без всяких перетворень, на каскадах, всі контури яких настроєні на одну частоту. Контур і лампа в таких системах — це основа підсилювального каскаду, основа всього приймача. Та не меншу роль контур і лампа відіграють у передавачі, генераторі радіочастотних коливань.

Ми вже говорили про те, що триелектродна лампа зробила революцію в радіотехніці. Але справжній переворот почався значно пізніше, коли в 1913 р. було виявлено, що за допомогою тріода можна добувати, генерувати електричні коливання високої частоти. Це було справді революціонізуюче відкриття.

Лампові передавачі добре настроювались на яку завгодно частоту, були прості й надійні і давали можливість легко здійснювати передачу мови й музики. З народженням лампового передавача радіо набуло свого сучасного вигляду.

Як же виникають радіохвилі, як працює ламповий генератор?

Коливальний контур генератора вмикають в анодне коло лампи, як показано на рис. 2.

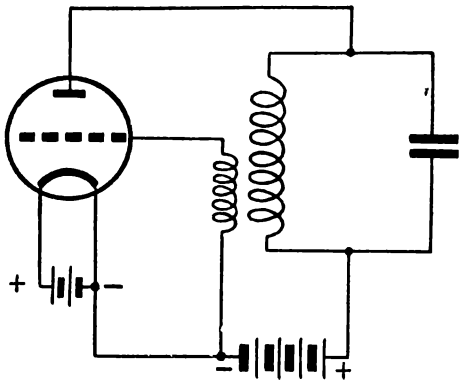


Рис. 2. Схема генератора електричних коливань.

Поруч з основною котушкою розміщається допоміжна, сіткова. Якщо в контурі відбуватимуться незатухаючі коливання, напрям струму періодично змінюватиметься, мінятиметься і магнітне поле в котушці контура. Змінне магнітне поле, яке появилося, впливає на витки близько розміщеної сіткової котушки і «наводить» в ній змінну напругу тієї самої частоти.

Ця напруга подається на сітку, яка заряджається навперемінно то позитивно, то негативно. Відповідно до цього автоматично змінюється і струм в анодному колі.

Ці зміни в свою чергу впливають на котушку контура, створюючи в ньому додаткові напруги, які не дають затухати власним коливанням контура. По суті справи, на сітку надходить невелика частина напруги високої частоти з контура, підсилюється і подається «в такт» знову на контур. Оскільки в анодне коло ця напруга приходить підсиленою, вона з лишком покриває всі втрати і коливання не затухають. Контур підтримує свої коливання за рахунок енергії анодної батареї, бо з неї береться енергія на підсилення сіткової напруги, яка кінець кінцем іде на покриття електричних «витрат» контура.

А витрати можуть бути не тільки у вигляді втрат. Коли хочуть випромінювати коливання, то вміщують поруч з основною ще одну котушку — антену. Тоді і в ній наведуться електромагнітні коливання тієї ж самої частоти і через антену випромінятся в простір. На такі втрати витрачається багато енергії, але в даному разі її не шкода: ця енергія піде на створення радіосигналів.

ЯК ПОШИРЮЮТЬСЯ РАДІОХВИЛІ

Вплив електричного струму на магнітну стрілку було відкрито ще в 1820 р. Але тільки через 11 років довгих і важких шукань великий англійський фізик Майкл Фарадей сформулював закон електромагнітної індукції. Він помітив, що, коли переміщати магніт біля дротяної котушки, в ній виникає електричний струм.

Оскільки струм виникає під впливом електричного поля, то, отже, виникнення цього поля завдячує своїм походженням зміні магнітного поля. Цим дослідом вперше було показано єдність електричних і магнітних явищ.

Надалі вчені прийшли до висновку, що завжди і скрізь всяка зміна магнітного поля обов'язково викликає появу електричного і, навпаки, зміна електричного поля завжди викликає появу магнітного. Таким чином, було встановлено, що електричні й магнітні поля — це один із проявів особливого виду матерії — так званого електромагнітного поля.

Багато важливих відкриттів і висновків у теорії електромагнітного поля зробив знаменитий англійський фізик Максвелл. В 1867 р. він довів, що, почавшись в одному місці, зміни (коливання) електричного поля поширюються в усіх напрямах все далі й далі, подібно до того як хвилі від кинутого каменя поширюються по поверхні води. У просторі утворюється «електромагнітна хвиля», яка поширюється, як показали розрахунки Максвелла, з швидкістю 300 тис. *км/сек*.

Якщо через провідник пропустити змінний струм високої частоти, то навколо нього утворюється змінне електромагнітне поле, а через те що напрям електричних і магнітних сил безперервно змінюватиметься в такт з частотою струму, то ми матимемо високочастотне змінне електромагнітне поле. У певних умовах змінне електромагнітне поле може втрачати зв'язок з провідником, який в даному разі стане випромінювальною антеною, і поширюватися в навколишній простір.

І навпаки, якщо ми вмістимо в електромагнітне поле провідник, то в ньому почне циркулювати змінний струм, звичайно, тієї самої частоти, яку має поле. В даному разі провідник стане відігравати роль приймальної антени.

Якщо в першому випадку провідник віддавав свою енергію електромагнітному полю, що поширюється від нього в усіх напрямах,

то в другому випадку, коли поле наводить у провіднику змінний електричний струм, воно передає свою енергію провідникові.

Таким чином, високочастотна енергія може випромінюватися і поширюватися у вигляді поля і знову «видобуватися» з поля, перетворюючись у змінний електричний струм високої частоти.

Неоціненною якістю змінних електромагнітних полів або електромагнітних хвиль є їх здатність поширюватися в просторі без провідників, та ще й з швидкістю світла. Цим чудесним властивостям електромагнітних хвиль і завдячує радіо своїми успіхами і можливостями.

Електромагнітні хвилі прекрасно поширюються в повітрі, але присутність повітря для них зовсім не обов'язкова.

Електромагнітні хвилі розрізняють за їх довжиною, або, що те саме, за частотою коливань змінного поля, яке їх несе.

Радіохвилі, тобто електромагнітні хвилі, які тепер використовуються в радіотехніці, займають область, або, як кажуть учені і інженери, спектр, електромагнітних хвиль завдовжки від 10 тис. *м* (30 *кгц)* до 1 *мм* (300 тис. *Мгц*).

Але це тільки частина величезного спектра електромагнітних хвиль. Світло і радіохвилі, теплові і рентгенові промені, ультрафіолетові промені, які дають нам загар, і грізні гамма-промені мають одну і ту саму природу — це електромагнітні коливання, які різняться тільки довжиною хвилі.

Зразу за радіохвилями (за убуваючою довжиною хвилі) ідуть теплові, або інфрачервоні, промені. Саме від них ми закриваємо обличчя, стоячи біля відкритої печі або палаючого багаття. За ними йде вузька ділянка хвиль видимого світла, зразу за якою йдуть ультрафіолетові промені. Око їх уже не бачить, але їх ще розрізняють фотопластинки. За ними йдуть рентгенові промені. Як відомо, вони мають властивість проникати через такі тіла і предмети, які зовсім не проникні для променів видимого світла. Вони проходять крізь тканини людського тіла, дерево і навіть метали.

Ще далі лежить ділянка гамма-променів, випромінюваних ядрами атомів радіоактивних речовин під час їх розпаду.

Важливо підкреслити, що межі між ділянками спектра вибрано умовно і дуже наближено. Ці ділянки йдуть безперервно одна за одною, переходять одна в одну і в деяких випадках навіть перекривають одна одну.

Розглянемо тепер докладніше спектр радіохвиль.

Умовно, щодо довжин хвиль, його поділено на довгі, середні, короткі і ультракороткі хвилі. Останній діапазон поділяється ще на метрові, дециметрові, сантиметрові і міліметрові хвилі (див. кольорову таблицю на стор. 464). Для радіомовлення виділено спеціальні, точно обмежені ділянки: 2000—750 *м* на довгохвильовому діапазоні, 600—180 *м* на середніх хвилях, 80—10 *м* на коротких і від 10 до 5 *м* на ультракоротких — це так звані радіомовні діапазони.

Інші ділянки радіоспектра призначаються для радіотелеграфного зв'язку, для радіозв'язку з літаками, для радіомаячної, морської та інших спеціальних радіослужб.

На хвилі 600 *м* передається знаменитий сигнал «SOS» — сигнал біди. На цій хвилі працюють усі аварійні передавачі.

Короткі хвилі служать для далеких магістральних зв'язків. На метрових хвилях ведуться телевізійні передачі. Дециметрові і сантиметрові хвилі використовує радіолокація, радіонавігація, радіогеодезія. Міліметрові хвилі останнім часом дедалі ширше використовуються в радіолокації, радіоспектроскопії і в спеціальних фізичних дослідженнях.

Всякі радіохвилі можуть за допомогою антени випромінюватись у простір і поширюватися у вигляді енергії електромагнітного поля без проводів, проте хвилі різної довжини поширюються не однаково і потребують різних розмірів антен.

Земля — це провідник електрики, хоч і не дуже добрий. Радіохвилі, проходячи над землею, викликають в ній електричні струми, на створення яких витрачається частина енергії електромагнітних хвиль. Цю енергію земля вбирає, і радіохвилі поступово слабшають.

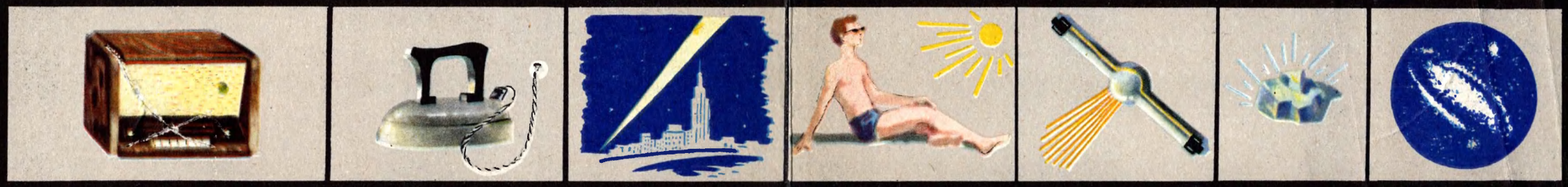
Крім того, радіохвиля слабшає і тому, що енергія випромінювання передавача розходиться в усіх напрямах простору, і чим далі від передавача, тим менше припадатиме енергії на

Таблиця 27. У верхній частині таблиці зображено спектр електромагнітних коливань. Як видно з наведених на схемі цифр, радіохвилі займають значну область в його початковій частині. В середній частині таблиці подано спектр радіохвиль; показано, як і на які діапазони його розбито, де і які хвилі застосовуються.

ДОВЖИНА ХВИЛІ

30000 м — 0,3 мм — 0,75 м — 0,4 м — 10 мм — 0,1 мм — 0,001 мм

РАДІОХВИЛІ | ІНФРАЧЕРВОНІ ПРОМЕНІ | ПРОМЕНІ ВИДИМОГО СВІТЛА | УЛЬТРАФІОЛЕТОВІ ПРОМЕНІ | РЕНТГЕНІВСЬКІ ПРОМЕНІ | ГАММА-ПРОМЕНІ | ФОТОНИ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ



СПЕКТР РАДІОХВИЛЬ

ЧАСТОТА 10 кгц — 100 кгц — 150 кгц — 400 кгц — 500 кгц — 1500 кгц — 1,65 мггц — 3,75 мггц — 6 мггц — 30 мггц — 50 мггц — 60 мггц — 300 мггц — 3000 мггц — 30 ггц — 100 ггц

ДОВГІ | СЕРЕДНІ | ПРОМІЖНІ | КОРОТКІ | УЛЬТРАКОРОТКІ

УЛЬТРАКОРОТКІ: МЕТРОВІ | ДЕЦИМЕТРОВІ | САНТИМЕТРОВІ

РАДІОМОВЛЕННЯ: ДОВГІ | СЕРЕДНІ | КОРОТКІ | УЛЬТРАКОРОТКІ

ТЕЛЕБАЧЕННЯ

РАДІОТЕЛЕГРАФ | СПЕЦ. СЛУЖБИ | РАДІОТЕЛЕГРАФ | РАДІОНАВІГАЦІЯ. РАДІОЛОКАЦІЯ. РАДІОГЕОДЕЗІЯ та ін.

KM

400

250

200

100

50

25

0

F_2

F_1

E

D

ІОНОСФЕРА

ШАР ОЗОНУ

ту саму площу, тим менше енергії зможе прийняти одна і та сама антена.

Чим коротша хвиля, тим сильніше її вбирає земна поверхня, тим меншу відстань вона проходить над землею. Тому і не дивно, що в перші роки розвитку радіотехніки для дальнього зв'язку застосовували хвилі від 1 до 30 *км* завдовжки. Хвилі, коротші від 100 *м*, вважались для далекого зв'язку непридатними, і їх відвели радіолюбителям.

Справа в тому, що передачі довгохвильових станцій можна приймати на відстанях до кількох тисяч кілометрів, причому гучність приймання зменшується плавно, без стрибків. Те саме справедливо і щодо середніх хвиль, правда, вони поширюються в межах однієї тисячі кілометрів. Зате вночі чутність середньохвильових станцій різко зростає. Що ж до коротких хвиль, то їх енергія в міру віддалення від передавача різко зменшується, бо вони дуже вбираються земною атмосферою.

Вчені зайнялись дослідженнями умов поширення і властивостей коротких і ультракоротких хвиль. Виявилося, що, йдучи біля поверхні «земним променем», такі хвилі справді швидко затухають, але, поширюючись угору під більшими кутами до горизонту, короткі хвилі не йдуть у простір, а повертаються назад!

Чому? Від чого вони можуть відбитися, від хмар? А як же в ясну погоду?

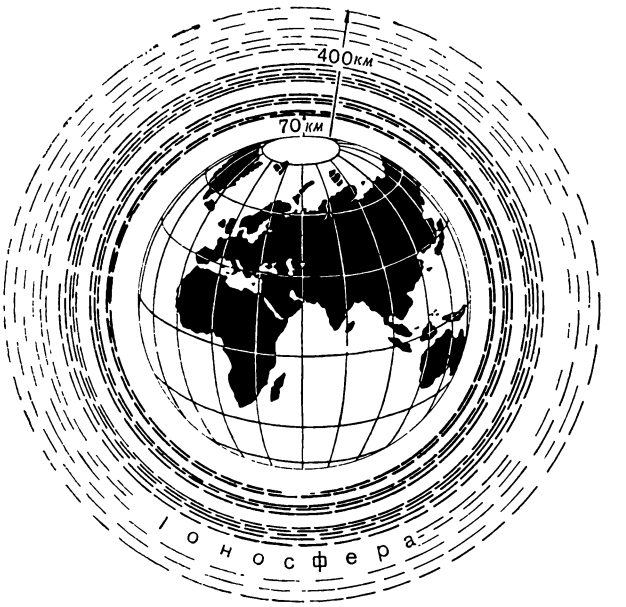
Для того щоб розібратися в усіх цих питаннях, треба було вивчити властивості повітряної оболонки, що оточує Землю.

ІОНОСФЕРА

Нашу планету оточує повітряний океан, що називається атмосферою. Нижній його прошарок, що щільно прилягає до земної поверхні, — тропосфера — легко піддається вивченню.

Дальший у висоту шар атмосфери — стратосфера, — що простягається від 15 до 70 *км*, теж порівняно добре вивчили за допомогою куль-зондів та інших методів.

І тільки властивості вищих шарів повітря до останнього часу лишались майже зовсім не відомими. Серйозне вивчення цієї частини атмосфери, яка має величезне значення для радіозв'язку, почалось тільки в останні роки, після появи потужних ракет і штучних супутників Землі.



Земля оточена шаром повітря, який проводить і відбиває радіохвилі.

Основну суму відомостей про іоносферу вчені одержали в результаті посередніх вимірювань і спостережень за різними фізичними процесами, головним чином за особливостями поширення електромагнітних коливань на цих висотах.

Посилене вивчення іоносфери почалось після того, як було з'ясовано, що радіохвилі певної довжини заломлюються в ній і відкидаються на Землю. Завдяки цьому явищу в 20-х роках радіолюбителям вдалось провести передачі на величезні відстані, причому на коротких хвилях, які в той час вважались «бросовими», непридатними для радіозв'язку.

У 1921 р. французький радіолюбитель на хвилі 20 *м* прийняв передачу малопотужної американської радіостанції, перекинувши, таким чином, перший радіоміст між Європою і Америкою.

Такі прийоми з Американського континенту стали дедалі частішими, а через рік уже було встановлено двосторонній радіозв'язок через Атлантику.

Таблиця 28. Земля оточена атмосферною оболонкою. Тільки на 40 *км* піднімаються для її дослідження кулізонди. Ще нижче лежить «стеля» літаків. На 200—470 *км* піднімають прилади дослідні ракети. Вище проходять орбіти штучних супутників Землі. На висоті від 100 до 1000 *км* відбуваються полярні сяйва; на висотах порядку 80—120 *км* згоряють метеори — «падаючі зорі». На висоті 70 *км* над Землею починається іоносфера.

Секрет далекодії коротких радіохвиль зацікавив радіофізиків. Ще в 1902 р. американський вчений Кеннелі і англійський вчений Хевісайд висловили припущення, що на великій висоті повинен бути шар повітря, який проводить і відбиває радіохвилі. Наддалекі радіолюбительські зв'язки підтвердили цю догадку, а сучасна наука точно встановила наявність іонізованих шарів повітря, які відбивають радіохвилі.

Які ж особливі властивості мають високі шари повітря, чим вони відрізняються від нашого звичайного «земного» повітря? Передусім, чим вище від Землі, тим повітря більш розріджене. Менша густина повітря, звичайно, ніяк не позначилася б на поширенні радіохвиль, але, виявляється, з висотою різко змінюються електричні властивості повітря: з ізолятора воно стає провідником електрики.

Чим же це пояснюється?

УТВОРЕННЯ ІОНІВ

Як ми вже говорили, гази, що входять до складу повітря, як і всі інші речовини, складаються з атомів і молекул. Відомо також, що молекули складаються з атомів, а ті в свою чергу — з електронів, що обертаються навколо важкого і складного ядра. Електрони несуть на собі негативний заряд, а ядро заряджене позитивно, причому загальний заряд ядра дорівнює зарядам усіх електронів. Таким чином, хоч окремі частини атома зв'язані електричними силами, в цілому атом у нормальному стані не має заряду — негативний заряд електронних оболонок зрівноважує позитивний заряд ядра. Те саме можна сказати і про молекулу — в нормальному стані вона нейтральна.

Проте атом, а значить, і молекула, що містить у собі цей атом, можуть у певних умовах втрачати один або кілька електронів. Тоді позитивний заряд ядра перевищуватиме заряд електронів. Атом і молекула будуть заряджені позитивно.

Може статися і навпаки — атом захопить «зайвий» електрон і зарядиться негативно. Атоми і молекули, які мають електричний заряд, називаються іонами.

Від цього слова і походить назва іоносфера — куляста повітряна оболонка Землі, що складається з іонізованих газів.

Наявність вільних електронів і заряджених іонів надає газові здатності проводити електричний струм.

Що ж примушує електрони покидати свої атоми і молекули, з якими вони зв'язані досить міцно? І чому такий процес відбувається тільки на великих висотах?

Справа тут полягає ось у чому. Потужний потік променів сонячного світла містить у собі невидимі ультрафіолетові промені. Більша частина цих променів зовсім не доходить до земної поверхні, бо їх вбирають частинки газів у верхній атмосфері. Вбирання енергії атомами супроводиться їх розщепленням. При утворенні вільних електронів та іонів енергія ультрафіолетових променів витрачається на іонізацію молекул і атомів.

Але не тільки ультрафіолетові промені Сонця викликають іонізацію. Випромінювання деяких зір ще багатше на ультрафіолетові промені, і, хоч через величезні відстані їх вплив у тисячі раз слабший, вони вносять свою частку іонів. Ультрафіолетові промені цих зір особливо важливі в період довгих зимових ночей, коли в іоносферу довго не попадають сонячні ультрафіолетові промені.

Від Сонця до нас доходить також потік найдрібніших частинок, так званих корпускул. Ці осколки ядер, протони, електрони та інші частинки мають величезну енергію і, стикаючись з частинками газу, іонізують верхні шари атмосфери. Верхні шари атмосфери сприймають, так би мовити, основний іонізуючий удар, вбирають основну частину енергії ультрафіолетового і корпускулярного випромінювання Сонця та зір і через це майже не пропускають їх у нижні шари.

Різнойменно заряджені частинки не живуть вічно, вони стикаються між собою і нейтралізуються, в результаті чого кількість вільних електронів та іонів зменшується. Але такий процес возз'єднання електронів і іонів відбувається по-різному на різних висотах. В нижніх шарах, де повітря густіше і частинок більше, зіткнення відбуваються частіше і возз'єднання іде швидше. У вищих шарах утворення нейтральних атомів і молекул відбувається дуже повільно, а безперервне опромінювання створює все нові й нові іони, в результаті чого Земля завжди оточена шаром іоносфери.

БУДОВА ІОНОСФЕРИ

Проте іоносфера неоднорідна. Багаторічні дослідження вчених за допомогою «наземних» методів дозволили встановити, що в іоносфері є чотири головних шари, що позначаються буквами латинського алфавіту: D, E, F_1 і F_2.

Шар *D* утворюється тільки вдень; висота його над Землею — 60—70 *км*.

Далі йде шар *E*. Це найстійкіший шар іоносфери, розміщений приблизно за 110 *км* над Землею.

На висоті 200 *км* лежить шар F_1, який появляється, так само як і шар *D*, тільки вдень і переважно влітку. Вночі ж, а також взимку він ніби піднімається до найвищого шару F_2 і зливається з ним.

F_2 — останній шар, найбільший, але в той же час і найбільш нестійкий, простягається від 250 до 400 *км* і вище.

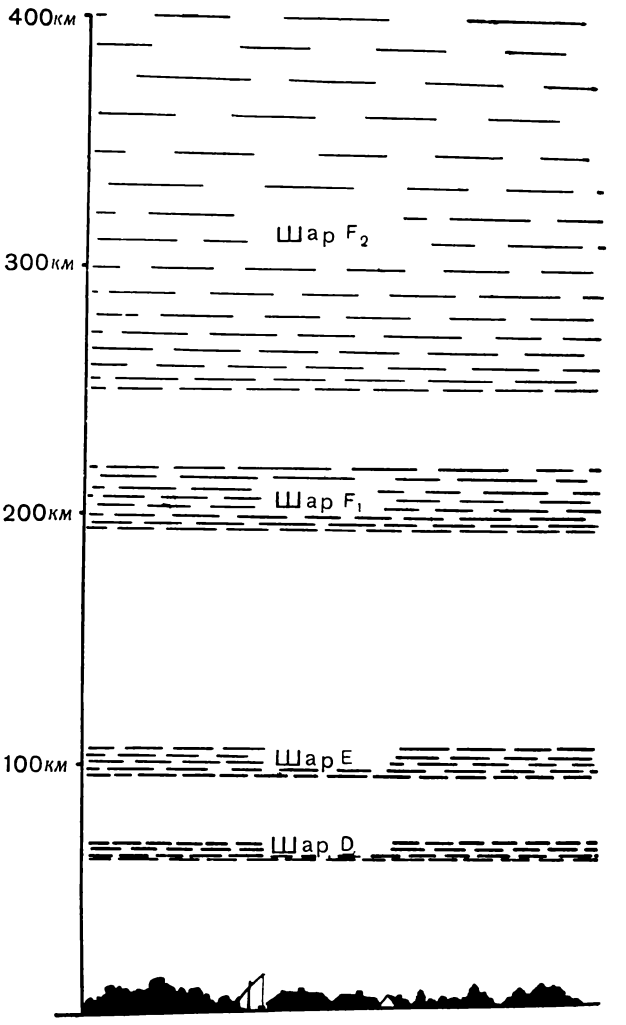
Найрізноманітніші способи застосовують вчені для вивчення складу газів, їх густини, температури та інших фізичних властивостей високих шарів атмосфери. Спостерігаючи за тим, як змінюється яскравість неба присмерком після заходу Сонця, вчені встановили, як змінюється густина повітря на різних висотах. А знаючи густину, порівняно легко можна визначити температуру і тиск.

Хімічний склад верхніх шарів повітря вдається визначити, вивчаючи спектральний склад світіння неба вночі. Виявляється, у безмісячну ніч небо має значно більшу яскравість, ніж та, яку дають йому всі зорі, разом узяті; це додаткове світло називається світінням самої атмосфери. Академік В. Г. Фесенков у 1946 р. визначив, що випромінюючий шар лежить на висоті 270 *км*.

Спектральний аналіз цього світіння показав, які гази і в якому стані знаходяться у верхніх шарах атмосфери. Легких газів на великій висоті майже немає. Як і внизу, повітря там складається з кисню і азоту. Світіння газів іоносфери пояснюється тим, що при возз'єднанні і нейтралізації іонів енергія ультрафіолетових променів, затрачена на розщеплення молекул, знову виділяється у вигляді світлових променів. Останніми дослідженнями за допомогою супутників встановлено, що названі чотири шари не є стабільними утвореннями, які постійно оточують Землю. Правильніше говорити про певні неоднорідності іоносфери, існування яких залежить від пори року і доби, від величини сонячної активності і ряду інших причин.

ПОЛЯРНІ СЯЙВА

Проте відома і інша форма світіння іоносферних газів — це знамениті полярні сяйва. Вони відбуваються головним чином біля полюсів Землі, де вони бувають до 100 раз на рік. В Ленінграді їх бачать п'ять, а в Москві — один-два рази на рік.



Чотири шари іоносфери.

Вчені виміряли висоти, на яких відбувається світіння газів, що створюють сяйва. Розрахунки показали, що нижня межа знаходиться, як правило, на висоті 100 *км*, а верхня сягає до 300—500 *км*, а іноді і до 1000—1100 *км* (див. кольорову таблицю на стор. 465). Виявилося, що полярні сяйва є дуже добрий інструмент для вивчення іоносфери. Відбуваючись в усій її товщі, випромінюючи досить сильне світло, вони дають можливість за спектральною картиною визначити склад світного газу, його температуру, а також ступінь його іонізації.

Спектральний аналіз полярних сяйв показав, що кисень у високих шарах знаходиться у вигляді атомів, а не молекул, — це наслідок дії сонячних випромінювань, які не тільки іонізують молекули, але й розбивають їх на окремі атоми.

Іншу спектральну картину показує азот. У спектрі сяйв він дає систему смуг, а не ліній. Це є ознакою того, що джерелом випромінювання є молекули. Правда, останні спостереження показали наявність у найвищих шарах іоносфери також і атомарного азоту.

Перше наукове пояснення полярних сяйв дав М. В. Ломоносов. У своїй праці «Слово про явища повітряні, що від електричної сили відбуваються» він висловив думку про те, що полярні сяйва породжуються електричними силами. Ломоносов провів відомий експеримент, в якому, діючи електрикою на розріджене повітря у скляній кулі, здобув світіння, яке нагадувало полярне сяйво.

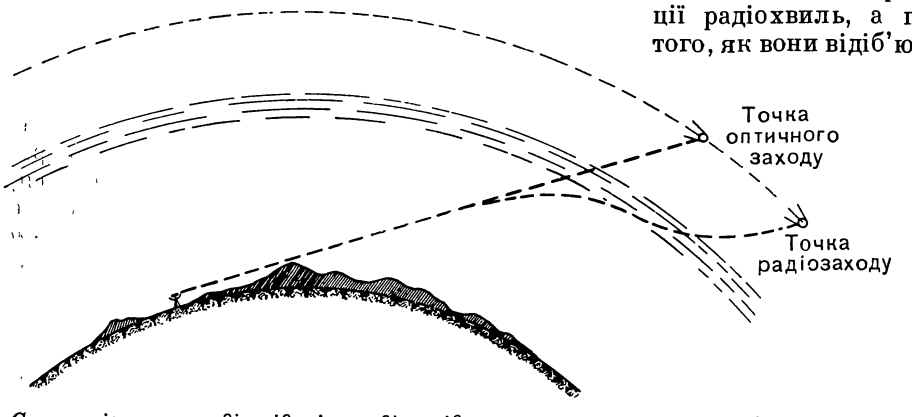
У досліді Ломоносова іони газу розганялись прикладеною електричною напругою і, стикаючись з молекулами, іонізували їх, створюючи дедалі потужніший потік іонів. Частина енергії при зіткненні частинок витрачається на збудження їх і супроводиться випромінюванням світла. Приблизно те ж саме відбувається в іоносфері. Швидкі сонячні корпускули, залітаючи в земну атмосферу, стикаються з частинками повітря, збуджують їх і примушують світитися.

Чому ж сяйва відбуваються головним чином у полярних областях? Тому, що Земля — велетенський магніт, її магнітне поле відхиляє заряджені корпускули від прямолінійного шляху і вони потрапляють у полярні області.

Сонце викликає в іоносфері хоч і невидиме, але не менш грандіозне явище магнітних бур, які завжди супроводять полярні сяйва. Потік корпускул, що летять від Сонця,— це по суті електричний струм, бо це потік заряджених частинок. А електричний струм завжди породжує в навколишньому просторі магнітне поле. Потік сонячних частинок викликає бурхливу іонізацію і, отже, появу величезної кількості заряджених частинок. Утворюються цілі хмари зарядів, які, переміщаючись в іоносфері, породжують сильні електричні струми. Струми ці дуже сильні: магнітні поля, що їх вони породжують, накладаючись на поле Землі, настільки спотворюють його, що стрілки компасів перестають показувати на північ, радіозв'язок через щонайсильніші завади припиняється, а іноді порушується і телеграфний зв'язок.

Полярні сяйва і магнітні бурі — це «відгуки» вибухів і виверження газоподібної речовини Сонця, так званих сонячних плям. З тих областей сонячної поверхні, де появляються плями, вириваються потужні потоки ультрафіолетових променів і величезна кількість корпускул, які досягають Землі і впливають на іоносферу. Ультрафіолетові промені, поширюючись із швидкістю світла, доходять до Землі значно швидше, ніж корпускули, які затрачують на свою подорож до Землі від 20 до 60 годин. Увесь цей час, поки триває «прибуття» частинок, в іоносфері відбуваються описані вище бурхливі явища.

Тепер великого поширення набув метод «прощупування» іоносфери за допомогою радіохвиль — так званий метод радіолуни. Він полягає ось у чому. Передавач іоносферної станції посилає вертикально вгору короткі порції радіохвиль, а приймач уловлює їх після того, як вони відіб'ються від іоносферних шарів. Вимірявши час, затрачений радіохвилею на проходження туди і назад, і знаючи швидкість її поширення, легко визначають висоту шару. Перша така станція була збудована в СРСР в 1932 р. у Мурманську відомим російським вченим М. О. Бонч-Бруєвичем.



Спостерігаючи «радіосхід» і «радіозахід» штучних супутників Землі, вчені дістали можливість вивчати особливості проходження радіохвиль через іоносферу.

Сучасні станції досить складні, майже цілком автоматизовані і дають повну картину стану іоно-

сфери. Випромінювана хвиля автоматично плавно змінює свою довжину в діапазоні коротких хвиль, а разом з цим так само плавно змінюється настройка приймача. Так за кілька хвилин, а іноді і секунд по черзі прощупуються всі шари іоносфери. Це дає можливість досліджувати швидкозмінні процеси і найповніше судити про фізичний стан іоносфери.

Тепер почалась ера штучних супутників і космічних польотів, яка відкрила нові блискучі можливості для вивчення будови іоносфери. Радіохвилі з супутника прощупують іоносферу наскрізь, причому за 1,5 години прощупується іоносфера навколо Землі і практично на всіх широтах.

Особливо багато цінних відомостей одержано в 1957—1958 рр. під час Міжнародного геофізичного року. Учені більш як 40 держав одночасно за погодженими програмами докладно вивчали іоносферу за допомогою супутників, висотних ракет та іоносферних станцій. Все це значно розширило наші знання про іоносферу і про закони поширення коротких радіохвиль.

ІОНОСФЕРА І ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

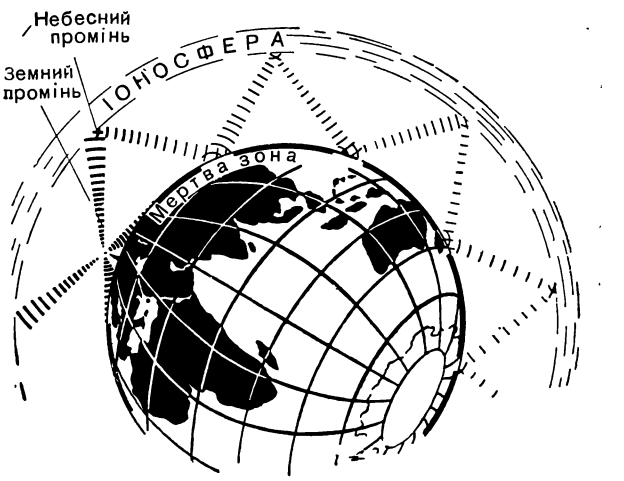
Тепер ми зможемо відповісти на поставлене вище питання — як поширюються в іоносфері радіохвилі.

Насамперед треба сказати, що хвилі різної довжини поширюються по-різному.

Короткі хвилі, наприклад, заломлюються в іоносфері, відхиляються від свого початкового прямолінійного шляху, викривляються і повертаються на Землю.

Але ступінь заломлення залежить в першу чергу від довжини хвилі. Довші хвилі заломлюються більше, коротші — менше. Найдалі з допомогою іоносфери поширюються короткі хвилі від 8 до 15 *м* завдовжки.

Уявлення про те, що чим коротша хвиля, тим у меншій мірі вона може «огинати» земну кулю, не зазнало змін. Справді, шлях короткої хвилі короткий — він вимірюється десятками кілометрів. Далі починається «мертва зона». Поверхневі хвилі сюди не доходять, а заломлені в іоносфері повертаються на Землю на великій відстані від передавача за межами «мертвої зони», яка може вимірюватися сотнями кілометрів. Але, промандрувавши через іоносферу, хвиля не «заспокоюється». Торкнувшись Землі, вона відбивається від її по-



Поширення коротких радіохвиль. В місцях, де на Землю падає промінь, знаходяться зони чутності. Між ними ровташовані «мертві зони».

верхні і знову прямує до іоносфери, де відбивається знову, і т. д.

Так шляхом багаторазових відбиттів радіохвиля може кілька разів обігнути земну кулю.

Інакше поводяться ультракороткі хвилі. Якщо порівняно довгі хвилі заломлюються в іоносфері, то хвилі, коротші від 10—15 *м*, пронизують її наскрізь і безповоротно відлітають у міжпланетний простір. З усіх видів радіохвиль ультракороткі хвилі стоять у спектрі електромагнітних хвиль найближче до світлових променів, тому у них багато спільного. Вони майже не огинають земної поверхні і поширюються прямолінійно в межах прямої видимості. Тому далекість дії ультракороткохвильових станцій невелика. Проте не можна сказати, щоб ці хвилі були некорисні для радіозв'язку, навпаки, їх використання має багато переваг. Оскільки такі хвилі поширюються тільки в межах прямої видимості, вони не заважають роботі інших радіостанцій, що використовують ті самі хвилі і розміщені за горизонтом. Тому вже на відстані 150—300 *км* можна ставити іншу станцію, що працює на тій самій хвилі, — завад не буде. Це означає, що одна і та ж сама частота може бути використана багаторазово, а загальна кількість радіостанцій — у багато разів збільшена.

Але є ще одна обставина, яка дозволяє працювати на ультракороткохвильовому діапазоні зразу величезній кількості станцій. Справа в тому, що вузький діапазон хвиль від 10 до 5 *м* завдовжки охоплює смугу частот

від 30 до 60 *Мгц*, тобто 30 *Мгц*. В той же час весь діапазон довгих і середніх хвиль (2000—200 *м*) відповідає частотам від 1,5 до 15 *Мгц*, тобто всього 13,5 *Мгц*. Це значить, що чим коротша хвиля, тим більше станцій розміститься на «одному метрі».

Ми вже говорили про те, що частоти сусідніх радіомовних станцій відрізняються одна від одної на 9—10 *кгц*. Звідси виходить, що для нормальної роботи станції, тобто для того, щоб у смугу пропускання однієї не «залізав» частотний спектр іншої станції, смуга кожної повинна бути трохи меншою, ніж 9 *кгц*.

Тому ультракороткохвильовий діапазон відкриває для радіозв'язку необмежені можливості: його смуга частот становить приблизно 30 мільйонів кілогерців. В ній можна розмістити в тисячу разів більше радіостанцій, ніж в діапазонах довгих і середніх радіохвиль, разом узятих.

Ультракороткі хвилі, що звичайно називаються УКХ, мають ще одну цікаву і важливу властивість, якій вони завдячують своєю малою довжиною і близькістю до світлових променів.

Пригадаємо, що відбувається в автомобільній фарі або прожекторі. Світло від лампочки, розміщеної у фокусі рефлектора, збирається у вузький пучок променів, який можна послати в будь-якому напрямі, причому яскравість такого сфокусованого пучка набагато перевищує яскравість лампочки.

Приблизно те ж саме можна проробити з радіохвилями УКХ діапазону. Можна побудувати дзеркала-антени, збирати і посилати радіохвилі вузькими пучками. Побудувати таку антену для довгих хвиль неможливо — занадто великі були б її розміри, бо треба, щоб діаметр дзеркала набагато перевищував довжину хвилі. Чим менша довжина хвилі, тим легше створити спрямовану антену, тим у вужчий і «яскравіший» пучок можна зібрати радіохвилі.

Ця особливість дала змогу успішно використати ультракороткі хвилі насамперед для радіолокації, радіорелейного зв'язку, телебачення та інших галузей, які потребують спрямованого випромінювання.

І ще одна властивість вигідно відрізняє хвилі УКХ діапазону — малі завади радіоприйманню. Цим, зокрема, пояснюється те, що в останні роки навіть дешеві приймачі поряд із звичайними діапазонами забезпечуються одним або кількома ультракороткохвильовими діапазонами.

Найкоротші хвилі радіоспектра — міліметрові — мають усі особливості поширення УКХ, але, на відміну від них, дуже вбираються атмосферою. Для хвиль, коротших від 1 *см*, туман, дощ, хмари уже є завадою і дуже обмежують далекість поширення.

Правда, для деяких довжин хвиль є «вікна» і коротші хвилі ослаблюються менше, ніж довші.

Хвилі, коротші від 1 *мм*, дуже сильно затухають в атмосфері теж за рахунок молекулярного вбирання. Тільки в області видимого світла (довжина хвилі близько 1 мікрона) появляється «оптичне вікно».

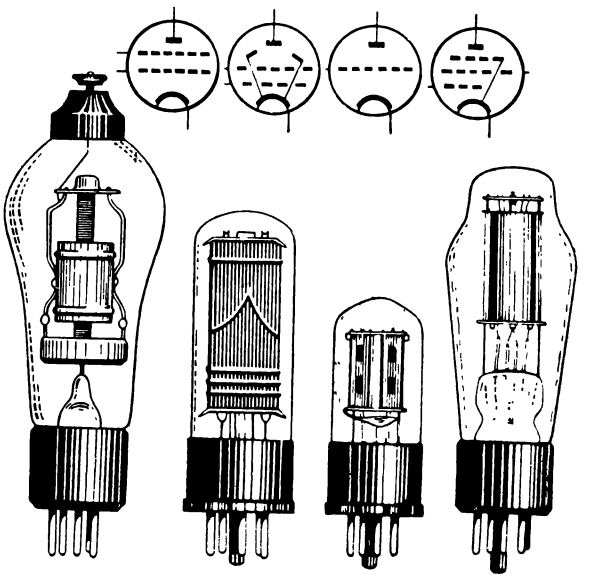
Такі самі вікна є і в спектрі інфрачервоних (теплових) променів.

Таким чином, ми бачили, що хвилі радіодіапазону поводяться по-різному, мають різні властивості поширення, і тому кожна ділянка цього діапазону має своє спеціальне застосування там, де найкраще можуть бути використані її особливості.

СУЧАСНІ РАДІОЛАМПИ

З народженням перших багатоелектродних радіоламп ми вже ознайомились на початку цієї статті. Там же говорилось про те, що радіолампи, які давали яскраве світло, поступово «погасли» завдяки появі підігрівних активованих катодів.

Але ще довго радіолампа була схожа на звичайну освітлювальну: цоколь вивершувався

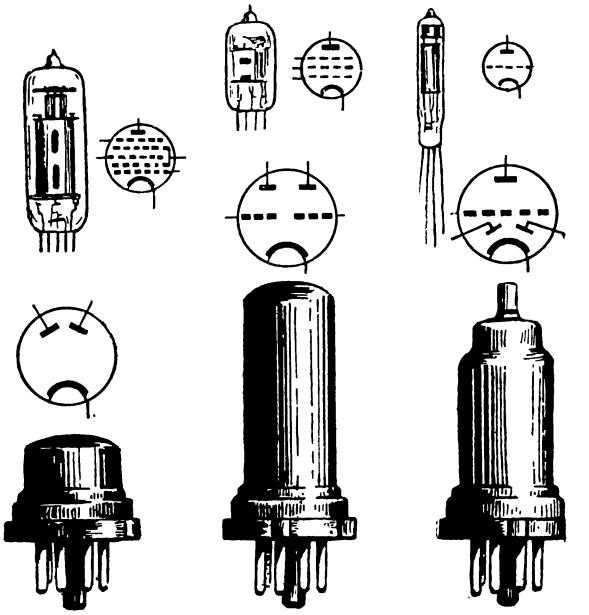


Скляні лампи.

більшим чи меншим скляним балоном лампи. Поступово балони «худли», з кулястих ставали циліндричними, діаметр їх перестав перевищувати розміри цоколя, і, нарешті, лампу вмістили в металевий балон. Тут вона остаточно втратила здатність світити.

Проте розміри радіоламп і далі зменшувались, а захоплення металевими балонами-оболонками поступово пройшло. Лампи здебільшого знову стали скляними, але розміри їх настільки зменшились, що цоколь уже просто не можна було приробити до такої малогабаритної лампи. Цоколь був би занадто великим, і лампа втратила б свою основну позитивну якість — малий розмір.

Появились пальчикові лампи. Назва їх не зовсім точно відбиває їх розміри: якщо в діаметрі вони справді не перевищують товщини пальця, то в довжину — в 2—3 рази менші. Слідом за пальчиковими конструктори створили субмініатюрні, надмініатюрні лампи, не більше від олівця завтовшки, причому, звичайно, якість радіоламп при цьому не знижувалась, а кращала.

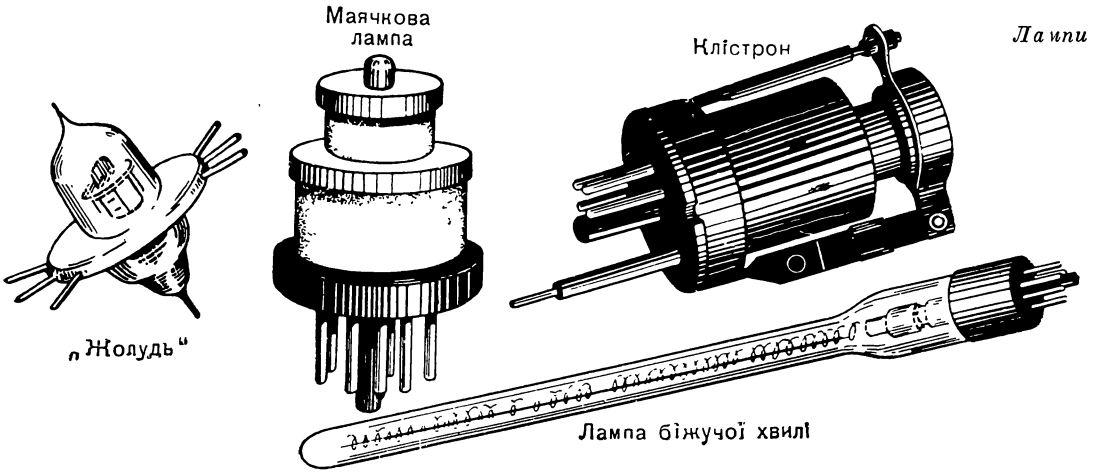


Металеві і малогабаритні лампи.

Якщо освітлювальна лампочка звичайно вкручується своїм цоколем у патрон, то радіолампа, як, очевидно, багатьом відомо, вставляється в спеціальну лампову панель своїми численними штирками — «ніжками», до кожної з яких приєднано свій електрод. Штирки в лампах «старовинних» і металевих серій вправлені в цоколь з добре ізолюючого матеріалу. Щоб ніжки лампи могли потрапити тільки в «свої» гнізда, цоколі забезпечуються різноманітними «ключами», які не дають можливості вставити лампу неправильно. Звичайно це круглий штир з виступом. В панельці є отвір для штиря і паз для виступу, так що лампу можна вставити тільки тоді, коли паз відповідає виступові і, отже, коли кожний штир буде проти свого гнізда.

У пальчикових ламп цоколя вже немає, але штирки ще є; вони впаяні в дно самої лампи. А надмініатюрні лампи уже не мають ніжок-штирів, і виводи від електродів здійснюються м'якими провідниками, які виходять із сплющеного «хвоста» лампи.

Створено і зовсім малюсінькі лампи — трохи більші від рисової зернини. Це, як правило, діоди або тріоди, і хоч вони розмірами можуть успішно конкурувати з криста-



Лампи НВЧ.

лічними приладами, але через малу практичність застосовуються рідко.

Цілковитою протилежністю таким лампам з точки зору розмірів є потужні генераторні радіолампи, що застосовуються на радіотрансляційних вузлах і передавальних радіомовних станціях. Розміри їх доходять мало не до зросту людини, а величезна потужність, що виділяється на анодах, змушує застосовувати водяне охолодження.

Але якщо звичайні тріоди, пентоди і т. д. поступово набули малюсіньких розмірів, зберігши всі свої особливості і властивості, то з переходом на дедалі коротші хвилі потрібні були і принципіально нові типи ламп.

Ми вже говорили, що при підсиленні довгих, середніх і коротких хвиль електронну лампу можна було вважати безінерційним приладом, який моментально реагує на всі зміни струму, хоч би як часто вони відбувалися. Справді, час прольоту електронів від катода до сітки був значно менший, ніж період застосовуваних частот. Порівняно з швидкістю електрона частота навіть коротких хвиль — це повільний процес.

Проте на величезних частотах, що відповідають хвилям УКХ діапазону, часом прольоту електронів у лампі нехтувати уже не можна: цей час став сумірним з періодом зміни струму надвисоких частот. Так, при хвилі в 1 *м* (300 тис. *кгц*) час прольоту електрона до сітки (0,003 *мксек*) стає рівним періодові коливання, а при хвилі 10 *см* вже в десять раз більший від нього.

Значить, електрон, що вилетів з електрода в той момент, коли сітка заряджена позитивно і притягує його, ще не долетівши до сітки, перестане зазнавати цього притягання і, навпаки, зазнає відштовхування і гальмування, бо напруга на сітці вже встигне змінити свій знак.

Конструктори почали зменшувати відстані між електродами, а також зменшувати міжелектродні ємності та індуктивності виводів. Так появились лампи типу «жолудь». Відстані між електродами в них зменшено до крайніх меж, а виводи розміщені по колу балона, що зробило їх коротшими і зменшило індуктивність, а також і взаємну ємність. В результаті таких конструктивних поліпшень «жолуді» ефективно працюють на хвилях до 1 *м*.

Для хвиль 10—20 *см* довелось створити вже зовсім не звичайні «маячкові» лампи. Виводи катода, сітки і анода зроблено тут у вигляді дисків, і проходять вони прямо через скло балона назовні: через штирки у цоколі підводиться тільки напруга розжарення.

Проте «жолуді» і навіть маячкові лампи не розв'язали проблеми добування великих коливальних потужностей у передавачах надвисоких частот і зовсім не працювали у діапазоні 2—3 *см*.

Це завдання дали змогу розв'язати лампи з принципіально новим способом керування електронним потоком.

Першою лампою такого типу був магнетрон. У магнетрона всього два електроди — катод і анод, на який подається напруга у кілька тисяч вольтів. Сітки у магнетрона немає. Невід'ємною частиною лампи, яка визначила її назву, є потужний постійний магніт, розміщений так, що силові лінії створюваного ним поля спрямовані паралельно катодові. Відомо, що магнітне поле викривляє шлях електронів, що в ньому рухаються, якщо тільки напрям їх руху не відповідає напрямові магнітних силових ліній.

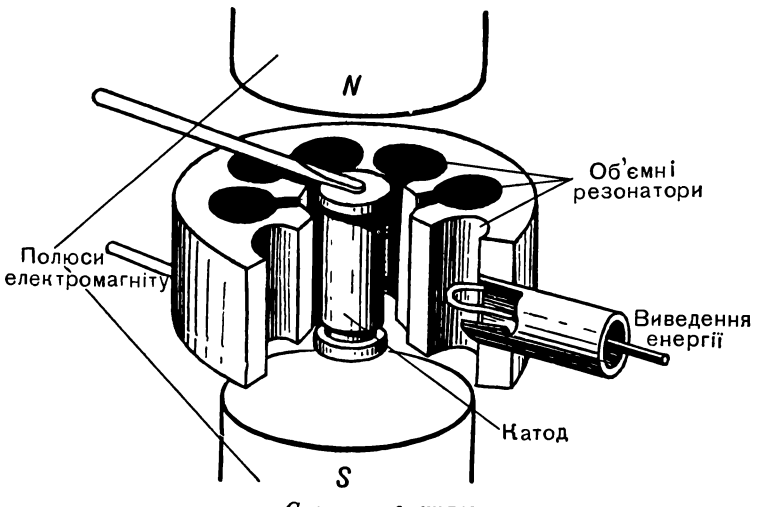


Схема магнетрона.

У магнетроні поле діє на електрони з найбільшою силою, бо вони летять у напрямі, перпендикулярному до силових ліній поля. Добираючи відповідне магнітне поле і напругу на аноді, можна примусити електрони рухатися по колу біля самої поверхні анода. Конструкцію цієї лампи так і виконано, щоб забезпечити існування колового потоку електронів. Круглий циліндр катода оточений масивним анодом. Електрони, що вилітають з катода,

відхиляються полем магніту і поповнюють лави електронного потоку, який віддає свою енергію на підтримання високочастотних коливань. Де ж створюються ці коливання?

Магнетрон сам генерує електромагнітні коливання, йому не потрібен, як тріодові, контур з дротяною котушкою зв'язку. Його анод — це масивне мідне кільце з численними циліндричними камерами, об'ємними резонаторами, які вузькими щілинами сполучаються з простором навколо катода, де створюється коловий потік електронів. Об'ємні резонатори і є коливальні контури для надвисоких частот. Такі контури вперше запропонував радянський вчений М. С. Нейман. Частота коливань, що виникають у резонаторах, визначається їх розмірами. Електрони, які рухаються поблизу щілин анода, що ведуть до резонаторів, збуджують в них коливання, віддаючи при цьому свою енергію. Втрата енергії приводить до втрати швидкості електронів, які взаємодіяли з резонаторами, і до ущільнення потоку електронів, коли вони проходять мимо щілин. При належному доборі всіх геометричних розмірів, напруги і величини магнітного поля ці «ущільнення електронного потоку» пролітатимуть мимо щілин резонаторів саме в ті моменти, коли вони «в такт» подають енергію коливанням об'ємного контура і, отже, підтримуватимуть ці коливання. В результаті в резонаторах встановляться незатухаючі коливання великої потужності.

У магнетронах удається одержувати коливання надвисоких частот з довжиною хвилі до 0,5 *см*. Вперше магнетрони стали використовувати на радіолокаційних станціях, і до цього часу без них не обходиться жоден радіолокатор.

Іншим приладом для генерування ультракоротких хвиль, який теж об'єднує в собі функції лампи і контура, є клістрон. На відміну від магнетрона, це, як правило, малопотужний генератор, хоч загальними принципами роботи клістрон і подібний до магнетрона. Резонатори у нього теж виконані разом з лампою, а коливання в них також підтримуються потоком електронів неоднакової густини.

Потік тут не кільцевий, як у магнетронів, а прямолінійний, тому електрони випромінюються катодом в одному напрямі, прискорюються спеціальним електродом і пролітають мимо резонатора.

Найчастіше застосовують так звані відбивні клістрони, де потік електронів, що пролетів мимо резонатора і розділений ним на зони ущільнення і розрідження, зустрічає на своєму шляху електрод, заряджений негативно, і, відбившись від нього, прямує назад у резонатор.

При правильному доборі напруг чергування згустків електронів збігається з частотою резонатора, і вони «в такт» віддаватимуть йому свою енергію. Клістрони генерують ті самі частоти, що і магнетрони. Крім радіолокації, вони застосовуються для створення надвисоких частот у радіоелектроніці.

Третій тип ламп, що широко застосовується в діапазоні сантиметрових хвиль, називається: «лампи біжучої хвилі» і «лампи зворотної хвилі».

Яка ж хвиля «біжить» у цій лампі?

Електромагнітне поле поширюється, як відомо, з швидкістю світла, а електронам навіть при величезних напругах в кілька тисяч вольтів можна надати швидкості, яка не перевищує $\frac{1}{10}$ швидкості світла. Тому, щоб використати взаємодію магнітного поля і електронного потоку, на чому і грунтується принцип цих ламп, необхідно якось сповільнити поширення електромагнітної хвилі і зменшити її швидкість до швидкості електронного потоку, тим самим забезпечивши ефективну взаємодію між ними.

Така лампа схожа на довгу пробірку з цоколем. По всій її довжині йде спіраль, по проводу якої рухається електромагнітна хвиля. Разом з хвилею оббігає витки спіралі з швидкістю світла і електромагнітне поле. Але вздовж спіралі, по її осі, поле переміщається у стільки разів повільніше, у скільки разів довжина проводу одного витка більша за крок спіралі.

Там же всередині спіралі по її геометричній осі пропускають пучок електронів. Коли сигнал, тобто електромагнітне коливання, іде по початку спіралі, він впливає на рівномірний потік електронів, перегруповуючи в ньому електрони за їх швидкостями. Згрупований потік, просуваючись уздовж спіралі, сам діє «в такт» на електромагнітне поле і, віддаючи йому свою енергію, підсилює його. В міру просування по спіралі поле безперервно підсилюється, і, якщо лампа, тобто її спіраль, має достатню довжину, вихідна напруга значно перевищить вхідний сигнал.

Лампи біжучої хвилі можуть підсилювати хвилі від 20 до 10 і навіть до 3 *см* завдовжки, чого не можуть робити ніякі інші типи радіоламп. Застосовуючи такі лампи, можна побудувати генератор, який працюватиме не на

одній якійсь частоті, як магнетрон, а зможе перестроюватися в широкому діапазоні частот.

В основному цими трьома типами ламп і обмежуються електровакуумні прилади, що працюють в діапазоні надвисоких частот. Найкоротші хвилі 0,5—2 *см* не можуть підсилюватись навіть лампами біжучої хвилі, але вони успішно генеруються магнетронами і клістронами. Останнім часом створено багато нових типів надвисокочастотних генераторних і підсилювальних ламп. У всіх цих лампах використовуються ті самі методи керування електронним потоком, що і в клістронах, магнетронах і лампах біжучої хвилі.

Сучасна радіотехніка використовує багато сотень різних типів найскладніших електровакуумних приладів. Серед них, крім звичайних радіоламп, електронні стабілізатори напруг і струмів, газозарядні лампи, електронні комутатори-перемикачі, фотоелементи, фотопомножувачі і численний клас електронно-променевих трубок.

ЕЛЕКТРОННИЙ ПРОМІНЬ

Електронно-променеві трубки — це чудесні прилади, які допомагають «бачити» електричні процеси. Вони дали можливість створити сучасне телебачення, без них неможлива радіолокація, вони широко застосовуються в найрізноманітніших приладах — від найпростіших лабораторних осцилографів до «запам'ятовуючих» елементів сучасних електронних обчислювальних машин.

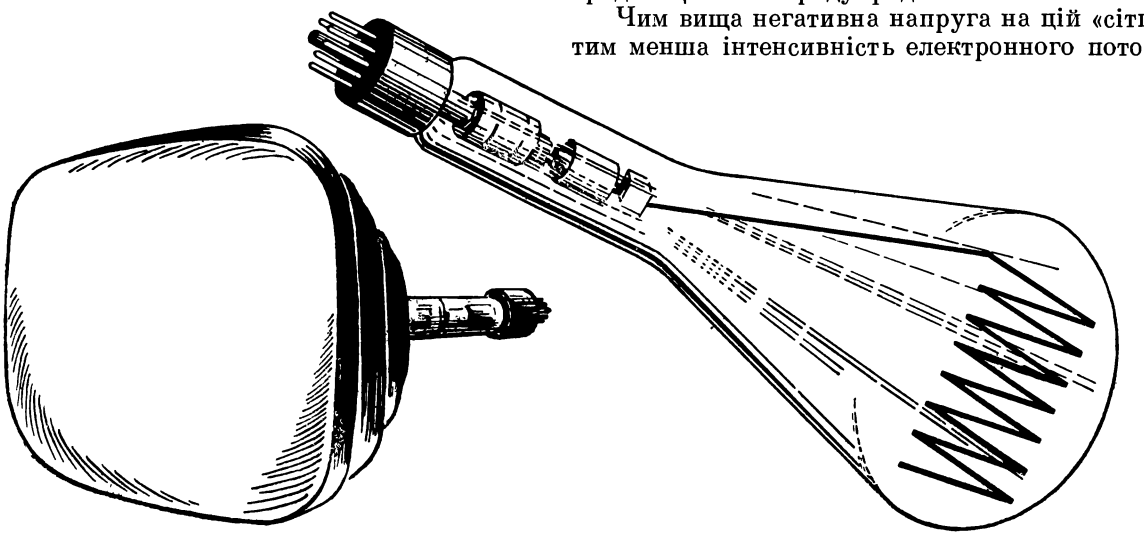
Які ж фізичні принципи покладено в основу роботи електронно-променевих трубок? Сама назва цього класу приладів підказує, що основа їх — електронний промінь.

Електронна трубка — це прилад для «рисування» електронним променем світлових рисунків на спеціальному екрані, який має здатність світитися в тому місці, на яке попадає потік електронів.

Електронно-променева трубка мало нагадує трубу. Це великий, звичайно скляний, іноді металевий конус з майже плоским скляним дном, діаметр якого іноді перевищує півметра. Від вершини конуса відходить циліндрична трубка-горловина, що закінчується звичайним «радіоламповим» цоколем. Якщо трубку поставити на цоколь, вона найшвидше нагадуватиме велику лійку. Вона герметично запаяна, повітря з неї викачано, і на її широке дно-екран зсередини «ллються» електрони.

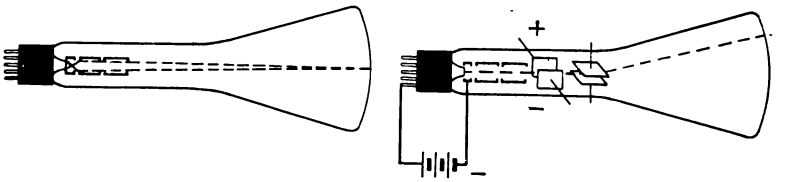
У горловині трубки розміщений спеціальної форми катод, з якого, як і в будь-якій радіолампі, вилітають електрони. Форма катода та інші спеціальні заходи дають можливість практично всі електрони спрямовувати в бік екрана. Але через те що вони призначені для «рисування», їх треба зібрати в тонкий гострий промінь і спрямувати в бік екрана. Цю операцію проробляють електронні лінзи, які так стискають промінь, що діаметр його біля екрана не перевищує частин міліметра. Перед фокусуванням, зразу ж після вильоту з катода, електрони пролітають через кільцевий електрод, який має назву керуючого електрода. Це свого роду радіолампова сітка.

Чим вища негативна напруга на цій «сітці», тим менша інтенсивність електронного потоку,



Електронно-променеві трубки.

тим менша кількість електронів і, головне, з меншою швидкістю ударяється об екран трубки. А яскравість світіння екрана тим більша, чим сильніше електрони ударяються об екран. Тому яскравість світної точки на екрані в тому місці, куди потрапляє промінь, залежатиме від напруги на керуючому електроді.



Фокусування променя Відхилення променя

Проте, звичайно, немає рації робити великий екран і розглядати на ньому одну світну точку, навіть якщо вона і може міняти яскравість. Точку треба переміщати по екрану, тоді вона зможе справді «рисувати» цілі зображення. Для цього застосовують електростатичні або електромагнітні системи відхилення. Вони відхиляють промінь від осі трубки і дають можливість послати його в будь-яке місце екрана.

Електростатична система складається з двох пар пластин, розміщених всередині горловини трубки. Кожна пара пластин відхиляє промінь в одній площині. Якщо, наприклад, на вертикальні пластини не подано напруги, то вони, природно, не зроблять ніякого впливу на потік електронів, що між ними проходить. А якщо на одну з них подати негативну напругу, а на другу — позитивну, то перша стане відштовхувати електронний промінь, а друга — його притягувати. В результаті промінь відхилиться до позитивної пластини і зміститься по екрану у відповідний бік. Якщо змінити знаки напруги, промінь відхилиться в зворотний бік.

Таким же чином горизонтально розміщені пластини переміщуватимуть промінь по екрану вгору або вниз.

Так само діють на промінь і електромагнітні системи, які відхиляють електронний промінь, діючи на нього магнітним полем різної напруженості.

Ще говорячи про лампи, ми підкреслювали, що електронний потік практично безінерційний. Це значить, що він практично вмить іде слідом за зміною напруги на відхиляючих пластинах. Але чи встежимо ми за точкою, якщо вона вмить переміщатиметься з кінця в кінець екрана? Звичайно, ні.

Однак виявляється, що властивості світної речовини екрана — люмінофору — такі, що він гасне не зразу. Як кажуть, екрани мають післясвітіння, тобто продовжують світитися, коли промінь уже пішов. Тому промінь лишає після себе світну смугу, яка позначає його шлях. Післясвітіння в деяких спеціальних радіолокаційних трубках доводять до кількох секунд. Звичайно промінь встигає кілька тисяч раз пробігти по екрану, майже безперервно «підсвічуючи» кожну точку і не даючи погаснути зображенню.

Електронно-променеві трубки найширше застосовують при дослідженні різних електричних процесів, бо вони дають можливість бачити «форму» електричної напруги, «бачити» радіосигнали, вивчати швидкозмінні процеси, налагоджувати, настроювати радіоапаратуру, спостерігаючи сигнал в якій завгодно точці схеми.

Подаючи на одну пару пластин випромінювану змінну напругу, а на другу — спеціальну напругу розгортки, ми одержимо вичерпну картину коливання. Розгортка ніби «розгортає» електричний коливальний процес у часі. Промінь креслить по екрану криву, яка відповідає формі і частоті поданої змінної напруги, а через те що він безінерційний, то на трубках можна розглядати коливання дуже високих частот.

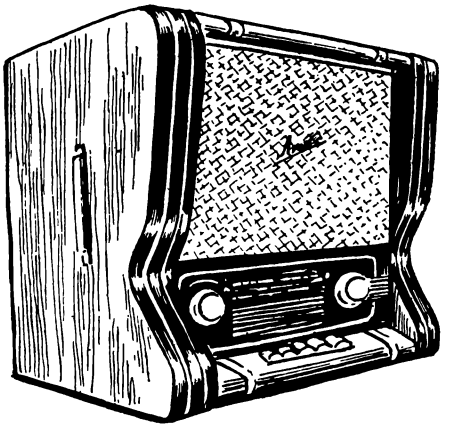
Електронно-променеві трубки безперервно видозмінюються і удосконалюються, а сфери їх застосування ще більше розширяються.

СУПЕРГЕТЕРОДИННЕ ПРИЙМАННЯ

Приймачі, які стоять у наших кімнатах, клубах, які продаються в магазинах, зовсім не схожі на перші «мовні ящики». Вони відрізняються від приймачів прямого підсилення, про які ми розповідали вище, не тільки технічною досконалістю, якістю ламп і обробки, але й принципом роботи.

Багато хто чув, мабуть, що звичайний приймач часто називають «супером», або, точніше, супергетеродинним приймачем. Чим же він кращий за приймач прямого підсилення, в чому його переваги?

Ми вже знаємо, що приймач можна сконструювати без ламп, тільки з одним детектором. Такі приймачі й називались детекторними. Не роблячи ніякого підсилення сигналів, вони були, звичайно, малочутливими і приймали тільки потужні, близько розміщені радіостанції.



У приймачах прямого підсилення сигнал до детектора підсилюється радіолампами, причому підсилення ведеться на частоті прийнятого сигналу, підсилюється безпосередньо сам сигнал.

У супері сигнал до детектора теж підсилюється за допомогою радіоламп, але підсилення іде не на частоті сигналу, а на деякій іншій частоті. Ця частота, що називається «проміжною», лишається сталою на всіх частотах настройки і на всіх діапазонах роботи приймача.

Перетворення коливань прийнятого сигналу в коливання проміжної частоти відбувається звичайно зразу після антени, у так званому перетворювальному каскаді приймача. Сигнал, що прийшов, «змішується» з сигналом «місцевого гетеродина», тобто малопотужного передавача, який і є частиною самої схеми приймача, частота якого близька до частоти сигналу.

Проміжна частота, що утворюється в результаті такого змішування, підсилюється і подається на ламповий детектор.

Завдяки тому, що в таких приймачах встановлено місцевий генератор — гетеродин, такі конструкції дістали назву супергетеродинів. «Супер» означає «надприймач», «кращий приймач», бо поява такого методу приймання дала можливість різко збільшити чутливість радіоприймачів, а значить, далекість і якість приймання.

У найбільшій мірі ці позитивні властивості супера виявляються в роботі на коротких хвилях.

Супер, звичайно, значно складніший, ніж приймачі прямого підсилення, але його переваги такі великі, що для радіомовлення приймачі прямого підсилення в наші дні вже не застосовуються. Навіть найпростіші і дешеві, як, наприклад, відомий усім приймач «Москвич», побудовані за супергетеродинною схемою.

Простежимо, по можливості докладніше, шлях сигналів від мікрофона, встановленого в студії, до динаміка кімнатного приймача.

Грає рояль або звучить гітара, чи співає співак, чи читає диктор — ми чуємо звуки. Як і всякі коливання, звукові хвилі розрізняють за амплітудою і частотою — довжиною хвилі. Писк комара — один з найвищих звуків, які може вловити людське вухо, має частоту в кілька тисяч герців, а звуки басових струн рояля коливаються в межах 25—30 *гц*. Наше вухо може вловлювати звукові коливання від 16 до 20 тис. *гц*. (Докладніше про звукові явища можна прочитати в статті «Звук і ультразвук»). Щоб передати звуки по радіо, треба перетворити звукові коливання в електричні коливання тієї самої частоти, потім «накласти» їх на радіохвилю і передати в ефір.

Перша ланка — це вловлювач і перетворювач звуків — мікрофон. Один з типів мікрофона має таку будову.

Тонка алюмінієва пластинка — мембрана — коливається під впливом звукових хвиль. Разом з мембраною коливається укріплена на ній легка котушечка, розміщена в свою чергу між полюсами магніту. Перетин витками котушки силових ліній магнітного поля, згідно з законом електромагнітної індукції, викликає у них появу електричного струму, причому амплітуда його залежить від сили звуку, а частота, звичайно, точно відповідає частоті коливань котушки в мембрані, тобто частоті звукових коливань, що на неї діють.

Тепер треба ці низькочастотні електричні коливання «накласти» на високочастотний радіосигнал, випромінюваний антенами. Такий процес «забарвлення» радіохвиль називається м о д у л я ц і є ю.

Здійснити які-небудь зміни високочастотного сигналу, які відповідали б коливанням низької частоти, можна різними способами, впливаючи, наприклад, на амплітуду або на частоту радіосигналу.

Амплітудну модуляцію широко використовують у радіомовленні. Низькочастотні коливання після попереднього підсилення надходять з мікрофона в спеціальний прилад — модулятор. Тут вони і впливають на амплітуду високочастотних коливань, змінюючи її в такт з низькочастотними.

Промодульований високочастотний сигнал, що несе на собі звуковий сигнал, який його «забарвлює», підсилюється і підводиться до антени передавальної радіостанції і випромінюється в простір у вигляді високочастотної електромагнітної хвилі.

Пройшовши багато кілометрів, електромагнітне поле досягне антени, протягнутої над вашим дахом або просто під стелею кімнати.

Антена — це свого роду коливальний контур з дуже широкою смугою пропускання. Електромагнітне поле кожної хвилі радіомовного діапазону збудить в ній струми високої частоти.

Що ж відбувається далі?

Кожний уміє настроювати приймач, але не всякий ясно уявляє собі, що відбувається при обертанні ручок.

Візьмемо, наприклад, відомий багатьом приймач «Москвич». Всього дві ручки виведено на його передню панель: права — вмикач і регулятор гучності, ліва — настройка. Повернемо праву ручку: легке клацання підтвердить, що ми ввімкнули приймач, але в перші секунди він мертвий — ніяких звуків не чутно. Це пояснюється тим, що потрібен час для підігрівання катодів ламп. Але ось катоди нагрілись до червоного, почалась емісія електронів, і з динаміка почувся характерний шум: лампи готові підсилювати сигнали.

Тепер можна настроювати приймач — «шукати» станції. Почнемо обертати ліву ручку — ручку настройки. Разом з нею почне обертатися стрілка на шкалі приймача, показуючи своїм кінцем, на яку довжину хвилі настроєно приймач. Але, звичайно, не стрілка визначає настройку: ручка настройки обертає вісь блока змінних конденсаторів, змінюється ємність, змінюється частота настройки резонансних контурів.

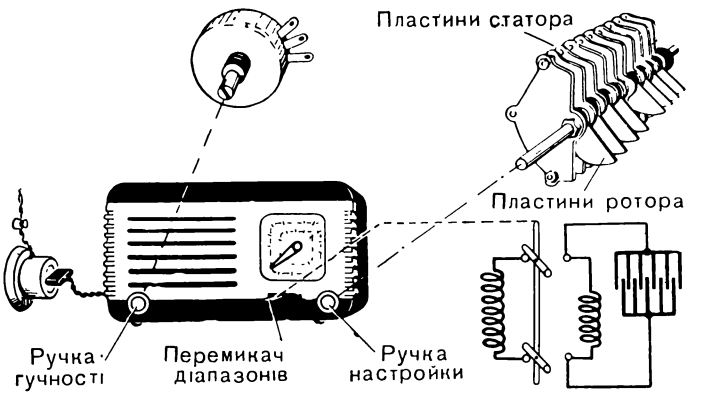
Блок змінних конденсаторів являє собою зв'язані одною віссю два конденсатори. Кожний з них складається з тонких алюмінієвих пластин особливої форми, розділених повітряним проміжком. Частина пластин конденсатора укріплена на осі і може повертатися, висуваючись з нерухомих пластин.

Рухомі пластини сполучені разом і утворюють ніби одну загальну пластину — ротор. Другу пластину — статор — утворюють теж сполучені разом нерухомі пластини.

Якщо пластини ротора зовсім висунути з пластин статора, то ємності у конденсатора практично не буде, бо не буде і самого конденсатора — залишиться тільки одна пластина! А якщо пластини ротора повністю всунути між пластинами статора, ємність буде максимальною. Проміжні положення ротора дають змогу одержувати які завгодно величини ємності і тим самим настроювати на яку завгодно частоту контур, в який входить ця ємність.

Чому ж у нашому приймачі два змінних конденсатори, а ротори їх розміщені на одній осі? Справа в тому, що «Москвич» — супергетеродинний приймач. Сигнал, що надійшов з антени, виділяється на вхідному резонансному контурі, в який входить один змінний конденсатор, і змішується у першій лампі з сигналом гетеродина, резонансний контур якого перестроюється другим конденсатором. А для того щоб частота гетеродина завжди відрізнялась від частоти сигналу на проміжну частоту, конденсатори насаджені на одну вісь. Тоді, змінюючи частоту настроювання вхідного контура, ми змінюватимемо і настройку гетеродина, причому різниця частот завжди дорівнюватиме проміжній.

Отже, обертаючи ручку настройки, ми обертаємо ротори змінних конденсаторів і змінюємо настройку вхідного контура і гетеродинного. Коли частота станції відповідає частоті вхідного контура, він виділить цю частоту. З контура висока частота радіосигналу надійде на одну з сіток першої змішувальної лампи, а



Що ми робимо, настроюючи приймач.

на другу — «прив'язаний» до частоти вхідного контура сигнал гетеродина.

Після взаємодії в електронному потоці («змішування») в контурі, увімкненому в анодне коло, виділиться проміжна частота, на яку настроєні всі вибірні контури підсилювача проміжної частоти, який і забезпечує підсилення сигналу для подачі його на детектор. Контури проміжної частоти не перестроюються; частота їх настройки весь час є сталою.

Дуже важливо відзначити, що модуляція не порушується при перетворенні високочастотного сигналу в проміжний, і, хоч на детектор надходить «не дуже високочастотний» сигнал (звичайно 465 *кгц*), він «розкрашений» так само, як і той, що надійшов в антену.

Виділення з модульованих коливань електричних коливань низької звукової частоти здійснює вже знайомий нам ламповий детектор. Він «виявляє» коливання проміжної частоти і детектує їх, причому випрямлений струм буде постійним, якщо постійна амплітуда радіосигналу, або, лишаючись випрямленим, змінюватиметься з звуковою частотою, якщо радіосигнал промодульовано. Детектування, як ми вже говорили, — процес, протилежний модуляції. З детектора знімаються такі самі електричні коливання звукової частоти, які було знято з мікрофона. Тому після підсилення їх зразу подають на динамік. Відбувається те ж саме, що й у мікрофоні, але в зворотному порядку: струми звукової частоти, взаємодіючи з полем магніту, викликають коливання котушки і зв'язаного з нею рупора — дифузора. Коливається навколишнє повітря, і звукова хвиля досягає наших вух.

Гучність звучання регулюється лівою ручкою — ручкою гучності. На її осі розміщено вже згаданий вимикач і змінний опір, змінюючи величину якого, ми змінюємо амплітуду напруги у підсилювачі низької частоти, а отже, і гучність.

Під самою шкалою є ще одна ручка, яку не можна обертати, але можна пересувати вправо або вліво. Це перемикач діапазонів. В цьому приймачі їх два: праве положення ручки відповідає довгохвильовому, ліве — середньохвильовому діапазону.

Коли повертати ручку, переміщаються зв'язані з нею контакти і підключаються до змінних конденсаторів інші котушки, з іншим числом витків. Тепер, при тій самій ємності, контури вже будуть настроєні на інші частоти і обертання ручки настройки змінюватиме настройку контурів у другому діапазоні частот.

Сучасні приймачі вищих класів мають 5—6 діапазонів, регулювання тембру, ширини смуги і т. д. Крім того, їх схеми включають в себе численні автоматичні регулювання. Але основа настройки приймача — контури і блок змінних конденсаторів.

РАДІОТЕЛЕГРАФ І РАДІОРЕЛЕЙНІ ЛІНІЇ

24 березня 1896 р. на відстань в 250 *м* було передано першу в світі радіограму з двох слів «Генріх Герц». Це була перша телеграфна передача по радіо за допомогою азбуки Морзе. Понад 20 років радіохвилі переносили тільки телеграфні крапки і тире. Проте і з появою радіотелефонного зв'язку, тобто можливості передавати безпосередньо мову і музику, радіотелеграф не втратив свого значення. Все ще велика його роль і в наші дні.

Телеграфна передача надійніша від радіотелефонної, менше боїться завад і може забезпечити зв'язок на будь-яких (земних) відстанях. Звичайно, сучасні радіотелеграфні апарати мало схожі на старовинні, в яких сигнал модулювався, тобто переривався на короткі і довгі відрізки — на крапки і тире, знаменитим «телеграфним ключем», а приймання відбувалося на слух. Поступово ручні «ключі» замінили автоматичними — т р а н с м і т е р а м и, а замість навушників і олівця телеграфіста появився о н д у л я т о р — прилад для приймання і записування телеграфних знаків. Це дало можливість різко збільшити швидкість передачі — до 400—500 слів на хвилину і зменшити кількість помилок та перекручень.

Але ще швидше стали передаватися радіотелеграми після винайдення фототрансмітера. Фотоелемент зчитує з паперової стрічки крапки і тире і перетворює їх в електричні сигнали різної тривалості. Саме вони і модулюють потім радіохвилю передавача.

Сучасні апарати дають можливість друкувати текст за допомогою клавишів, як на друкарській машинці, а приймання ведуть самостійно, без допомоги людини. Букводрукуючий апарат приймає сигнали і друкує їх зразу у вигляді букв на телеграфну стрічку.

Наша вітчизняна радіотелеграфія досягла високого рівня і дає змогу вести упевнену передачу до 1000 слів на хвилину.

Тепер радіотелеграфний зв'язок забезпечується спеціальними магістральними приймачами. В нашій країні на основних лініях зв'язку використовують і радіо, і проводи.

В разі потреби вони заміняють і доповнюють одне одного.

По радіо передають не тільки букви, мову й музику, але й фотознімки, рисунки, копії документів. Велике фото, розміром як сторінка шкільного зошита, можна передати з Москви в Америку за 10 хв.

У сучасних телефонно-телеграфних лініях зв'язку широко застосовують підсилювачі на радіолампах. Справа тут ось у чому. Лінія Москва — Хабаровськ, наприклад, має довжину 7—8 тис. *км*. Пройшовши такий шлях, сигнали дуже слабшають. Тому в деяких проміжних пунктах доводиться ставити підсилювачі.

Радянські вчені створили систему передачі повідомлень з допомогою високочастотних коливань, так званий ВЧ (високочастотний) телефон. По проводах передають не звичайні телефонні струми низької — звукової — частоти, а коливання високої частоти — радіочастоти, промодульовані (як і в радіоприймачі) низькими, звуковими, частотами. Так само як в ефірі, радіохвилі різної довжини не змішуються між собою і успішно виділяються приймачем. Для цього на приймальному кінці лінії ставлять спеціальні вузькосмугові фільтри; кожний з них пропускає лише ті частоти, які призначаються тільки для одного якогось телефону, або, як кажуть інженери, для одного «каналу». Далі сигнали перетворюються, як і в приймачі: вони підсилюються, детектуються, і струми звукової частоти надходять у телефон.

Така система передачі дає змогу по одному кабелю одночасно передавати понад тисячу телефонних розмов і кілька програм телебачення. Легко собі уявити, скільки проводів довелося б тягти між містами при сучасній потребі зв'язку, якби радіо не забезпечило техніку проводів новими засобами.

Застосування для цієї мети ультракоротких хвиль дає змогу ще більше «ущільнювати» лінії і використовувати ті самі методи і ту саму апаратуру в безпровідному радіозв'язку — для так званих радіорелейних або ретрансляційних ліній.

Радіорелейна лінія — це ланцюжок приймально-передавальних УКХ радіостанцій. Через те що ультракороткі хвилі поширюються, як правило, тільки в межах прямої видимості, то такі станції розміщаються на відстані 50—60 *км* одна від одної, а в горах — на 120—150 *км*. Антена кожної проміжної станції «дивиться» точно в бік дальшої і посилає вузьким променем радіохвилі. Прийнявши сигнали попередньої, кожна дальша станція підсилює їх і передає далі. Апаратура таких проміжних станцій досить проста, потужність передавачів невелика, бо вся енергія радіохвилі передається тільки одному адресатові, а не випромінюється, як у радіо- і телевізійних передавальних станціях, в усіх напрямах. Спрямована передача, малі довжини хвиль, складні види модуляції — все це цілком усуває вплив атмосферних і всяких інших завад.

Радіорелейні лінії дають змогу охоплювати величезну територію. Особливо цінним є те, що по таких лініях можна вести багатоканальний зв'язок — ущільнюючи лінію, передавати зразу кілька програм телебачення, радіомовлення і тисячі телефонних розмов.

У нашій країні провадиться широке будівництво цих ліній.

Недалеко той час, коли програму Московського телецентра дивитимуться не тільки в Ленінграді і Києві, а і в багатьох інших далеких і близьких містах СРСР.

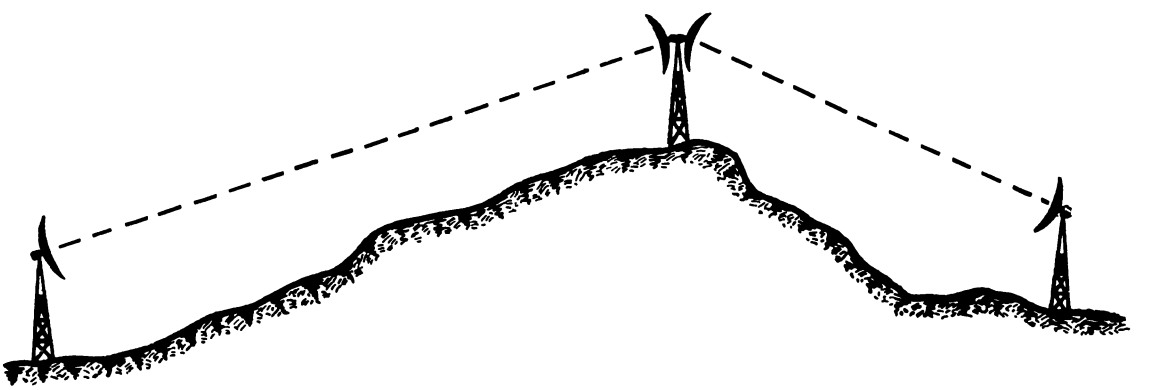
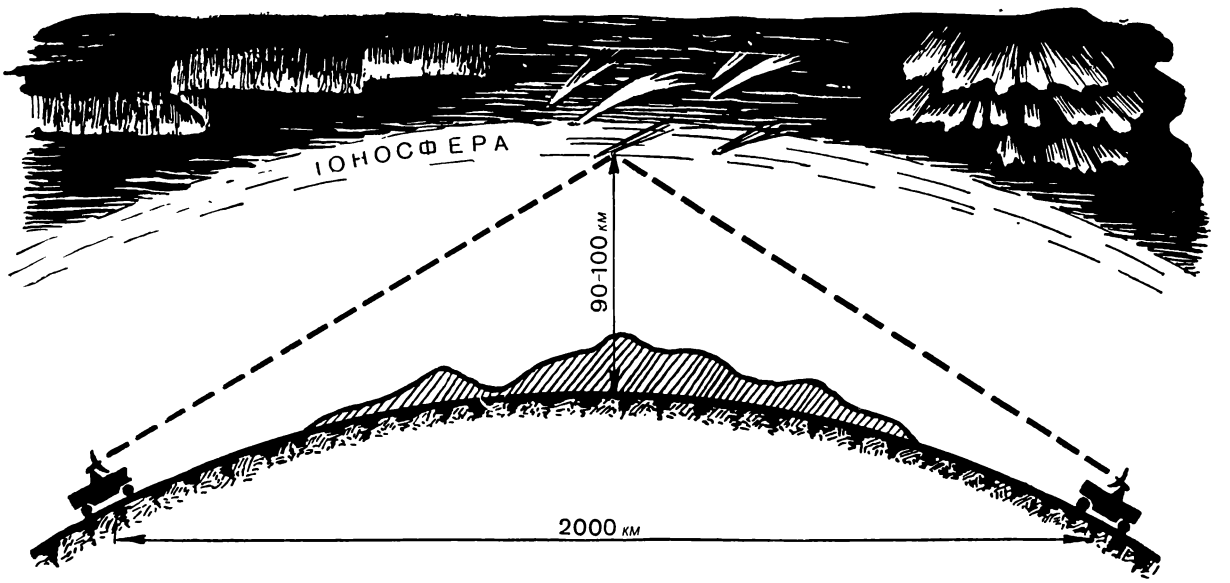


Схема ретрансляції.



Зв'язок «на хвостах метеорів».

Проте радіорелейні лінії — це ще не останнє слово в техніці передачі ультракоротких хвиль на великі відстані.

НОВІ ВИДИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

Ще в кінці другої світової війни оператори морських радіолокаційних станцій часто спостерігали зображення берегів, віддалених від них на сотні і тисячі кілометрів. Потім, у післявоєнні роки, коли телебачення почало бурхливо розвиватися, дедалі частіше надходили повідомлення про приймання телевізійних зображень на великих відстанях.

Вчені розгадали причину цих явищ і навчились їх використовувати. Виявилось, що ультракороткі хвилі від 10 до 5 *м*, на яких саме і працюють телевізійні передавачі і частина радіолокаційних станцій, мають властивість так званого дифузного, розсіяного, поширення.

Справа в тому, що в іоносфері, а також у стратосфері густина і ступінь електричної зарядженості її газів не однакові. Такі неоднорідності виникають від різних причин. Їх викликають метеори, що безперервно згоряють, північні сяйва, різна інтенсивність ультрафіолетових променів і т. п.

В результаті цих неоднорідностей радіохвилі метрового діапазону розсіюються подібно до того, як крапельки туману розсіюють промінь автомобільної фари.

Якщо послати спрямованою антеною вузький пучок радіохвиль під невеликим кутом до горизонту, то радіохвилі не просто викривляться, як у короткохвильовому радіомовному діапазоні, а частково пройдуть наскрізь, частково розсіються в усіх напрямах. Спрямувавши туди антену приймальної станції, можна уловити частину розсіяної енергії.

Дифузний радіозв'язок надійний, не боїться завад, але має і хиби. Так, для нього потрібні потужні передавачі, чутливі приймачі і антени великої спрямованості.

Не можна, наприклад, при ньому упевнено підтримувати зв'язок ближче як на 1000 *км*. Ближче, а не далі! Справа в тому, що коли спрямувати антену під більшим кутом до горизонту, то майже вся енергія пройде крізь іонізований шар і розсіювання не буде.

Є і інша різновидність дифузного поширення радіохвиль — тропосферне розсіювання. Воно відбувається в шарах, що лежать значно нижче. Залежно від стану погоди, і особливо часто над морем, виникають так звані повітряні радіохвилеводи. Це своєрідні канали, якими ультракороткі хвилі можуть поширюватися, не затухаючи, на відстані до 1000 *км*. Причому по таких хвилеводах вільно подорожують і хвилі від кількох метрів до кількох сантиметрів завдовжки. Саме завдяки цьому явищу 10-сантиметрова військова радіолокаційна станція, встановлена в Індії в районі Бомбея, «бачила» за

2000 *км* береги Аравійського півострова ще в 1940—1945 рр.

Відомо, що кожного дня в атмосфері нашої планети згоряє 5—10 млн. метеорів. Навіть малюсінькі з них лишають при цьому за собою «хвіст» іонізованих газів. Слід від метеора завбільшки як головка булавки має довжину до 10 *км* і держиться кілька секунд. Хвилі метрового діапазону добре відбиваються від такого іонізованого стовпа. Тому, спрямувавши антену туди, де згоряють «падаючі зорі», ми зможемо користуватися їх хвостами як антенами ретрансляційних станцій.

Так працює збудована в Канаді система станцій для далекого телеграфного зв'язку, названа «Жаннет». Розділені відстанню в 1500 *км*, приймальна і передавальна станції спрямовують свої антени в точку, що лежить на висоті 90 *км* над Землею і знаходиться приблизно посередині між станціями. Саме на цій висоті згоряють метеори. Станція «чекає» появи іонізованого хвоста. Як тільки загориться метеор, вона автоматично починає передавати телеграму з швидкістю 2 тис. слів на хвилину. Приймальна станція повинна теж спішити і швидко записати сигнали — адже передача автоматично кінчається через кілька секунд, коли «хвіст погасне».

Такий зв'язок «на хвостах падаючих зір» має дуже багато переваг. Йому не страшні атмосферні завади і різні іоносферні збурення, особливо сильні в зоні полярних сяйв. Швидкість передачі повідомлень завжди дуже велика, бо метеорів більше ніж досить. Потужність передавачів потрібна дуже мала, бо стовп іонізованих газів добре відбиває радіохвилі.

Досліди для вивчення і застосування нових видів радіозв'язку почались зовсім недавно — 10—12 років тому. Але вже досягнуто чудових успіхів, які дають можливість реально уявити собі радіозв'язок найближчого майбутнього. Не тільки телеграми, але й зображення можна буде передавати на які завгодно відстані.

У нашій країні з її величезними відстанями нові методи особливо перспективні. Замість десятків радіорелейних ретрансляційних станцій появляться лише кілька потужних передавачів із спрямованими антенами. Розміщаючись на відстані 1,5—2 тис. *км* одна від одної, вони за 5—6 стрибків перенесуть телевізійну передачу з Москви у Владивосток. Нові типи ультракороткохвильового зв'язку і розгалужена сітка радіорелейних ліній дадуть змогу зв'язатися з найбільш віддаленими куточками нашої Батьківщини.

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА

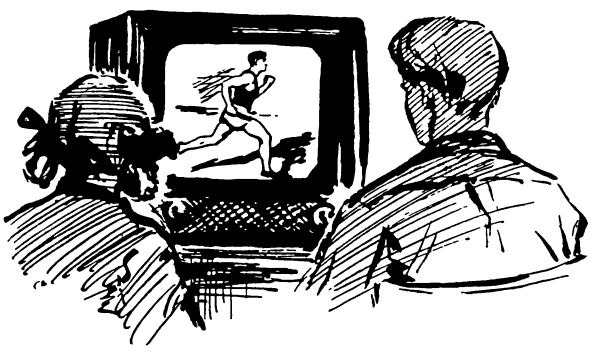
Наш вік дедалі частіше називають атомним. Та не менш правильним було б назвати його віком електроніки. Точніше, наші часи треба назвати початком епохи радіоелектроніки. Ця галузь наукового знання зараз надзвичайно швидко розвивається, межі її застосування безперервно розширяються, вона породжує нові відкриття і проникає буквально в усі галузі техніки, народного господарства, побуту.

Радіоелектронна промисловість займає значне місце в загальному виробництві кожної технічно розвиненої країни. В багатьох країнах випускаються мільйони електронних ламп та інших електровакуумних приладів. Різноманітні способи їх застосування і є предметом електроніки.

Проте, народившись разом з радіо і для радіо, радіолампи не можуть існувати без радіосхем і елементів, так само як сучасна радіотехніка неможлива без ламп, електронних трубок і фотоелементів. В наші дні радіотехніка і електроніка так тісно переплітаються між собою, що межу між ними провести неможливо. Тому тепер ці галузі техніки об'єднує одна назва — р а д і о е л е к т р о н і к а.

Радіолокація, радіонавігація, радіоастрономія, радіоспектроскопія і т. д., зародившись з радіотехніки і електроніки, виросли в самостійні галузі техніки, але всі вони, ніби підкреслюючи своє походження, зберегли на початку назв слово «радіо».

Мабуть, тільки телебачення в назві не має такого «радіоклейма». Але телевізор, по суті справи, — складний радіоприймач, вірніше, два радіоприймачі, з яких один приймає (як і звичайні радіоприймачі) звуковий супровід передач, а другий — сигнали зображення, яке відтворюється на екрані кінескопа. Телевізійні сигнали звуку і зображення передаються

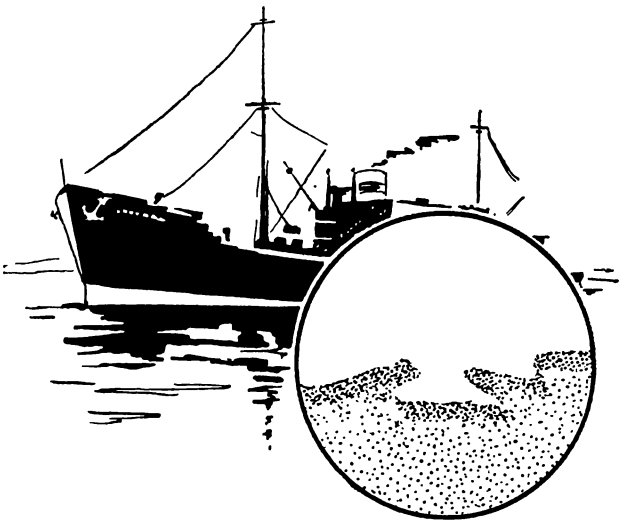


ультракороткими хвилями метрового діапазону. Як правило, це хвилі 5—7,5 *м* завдовжки.

Чому ж для телевізійних передач вибрано діапазон УКХ? Справа в тому, що коли для передачі мови й музики радіомовним станціям потрібна смуга в 10 *кгц*, то для передачі рухомого зображення потрібна смуга в 5—6 тис. *кгц*. Це значить, що одна телевізійна передача зайняла б смугу, в якій могли б працювати 500—600 радіомовних станцій! Тому довелось використати просторий ультракороткохвильовий діапазон, вільний до того ж від атмосферних і взаємних завад.

Але, як ми вже знаємо, поширення хвиль цього діапазону обмежене горизонтом. І тільки останні досягнення у цій галузі, такі, як радіорелейні лінії і дифузне поширення, дають змогу передавати телевізійні програми на великі відстані. Є і інші способи передачі широкосмугових телевізійних програм: один з них — застосування спеціального, так званого коаксіального, кабеля. Саме так з Москви в Калінін регулярно передається програма московського телецентра.

Високий рівень сучасної техніки дає змогу проектувати хвилеводні лінії для міжміської передачі. Металеві труби прямокутного перерізу протягнуться на сотні кілометрів, а всередині їх, майже не ослаблюючись, з швидкістю світла полетять радіохвилі. Перед радянськими радіоконструкторами стоїть завдання в найближчі роки розробити комплекс апаратури для обслуговування таких хвилеводних міжміських ліній і приступити до їх створення.



Корабельний локатор «бачить» море і гавань.

Всі описані тут способи застосовуватимуться якнайширше, тим більше, що в найближчий рік-два стануть до ладу станції кольорового телебачення, для яких потрібні ще ширші смуги. Перший кольоровий телецентр створюється в Москві, причому його передачі матимуть цілковиту сумісність з звичайною системою чорно-білого телебачення. Це означає, що передачі кольорового телецентра прийматимуться звичайними телевізорами, а кольорові телеприймачі в свою чергу прийматимуть чорно-білі програми, але, звичайно, без кольорового забарвлення.

Телебачення використовує радіохвилі для перенесення зображень і широкосмугові радіоприймачі для їх приймання, але основа телевізора — електронно-променева трубка — витвір електроніки.

У 1907 р. російський вчений проф. Б. Л. Розінг вперше запропонував використати електронно-променеву трубку для одержання зображень. З того часу дуже змінились і багато досконалішими стали спеціально виготовлювані для телевізорів трубки-кінескопи, але принцип їх роботи лишився той самий. Електронний промінь рядок за рядком пробігає весь екран і створює світний прямокутник—растр. Якщо тепер на керуючий електрод (на сітку) подати модульований, тобто «розкрашений», сигнал, яскравість променя змінюватиметься, кожна точка кожного рядка світитиметься відповідно до прибулого сигналу, і на екрані виникне зображення. Воно точно відповідатиме тій картині в студії, на яку спрямовано передавальну камеру. Промінь в цій камері теж по рядках «прочитав» передавану сцену, потім модулятор відповідно до прочитаного промодулював («розрисував») сигнал, а передавач випромінив його в ефір.

Електронно-променева трубка відіграє значну роль і в іншій найважливішій галузі науки наших днів — радіолокації. Її завдання — визначати за допомогою радіохвиль місце різних об'єктів на воді, у повітрі і на суші.

Чим же тут можуть допомогти радіохвилі?

Насамперед у локації застосовуються ультракороткі хвилі дециметрового і сантиметрового діапазону. Як ми вже знаємо, їх можна випромінювати вузькими пучками з допомогою спрямованих антен. Як і всі електромагнітні коливання, поширюються ці хвилі із сталою швидкістю — швидкістю світла. Через те що УКХ набагато коротші від великих об'єктів— літаків і кораблів, то вони не огинають їх, як

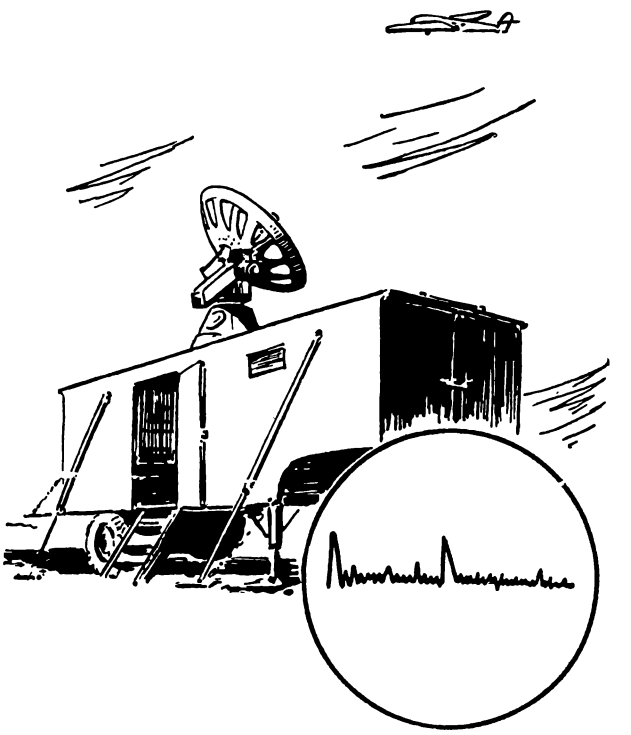
довгі хвилі, а відбиваються, вірніше перевипромінюються, цими об'єктами в усіх напрямах. Саме ці особливості УКХ і дали змогу створити радіолокацію.

Передавач локатора випромінює радіохвилі короткими імпульсами — ніби порціями, розділеними великими інтервалами. Дуже часто тривалість роботи, тривалість імпульсу в 1000 раз менша, ніж час паузи. Випромінивши такий імпульс, локатор чекає відповіді, його антена переключається з передачі на приймання. Якщо в тому напрямі, куди послано коротку порцію радіохвиль, є якийсь предмет, радіохвилі відіб'ються від нього і якась частина повернеться назад, до місця, звідки їх послано. Відбитий імпульс приймається чутливим приймачем, підсилюється і подається на електронно-променеву трубку. Тут його буде видно як світний стовпчик або точку. В момент випромінювання сигналу на трубку подається зондуючий імпульс. Але відбитий луна-імпульс не збігається з ним, бо приходить на трубку пізніше, затративши на подорож до цілі і назад якийсь час. Вимірявши цей час і знаючи швидкість поширення радіохвиль, можна точно обчислити відстань до об'єкта, а знаючи, куди націлено промінь антени, — і його місцезнаходження.

Якщо ціль рухатиметься, луна-імпульс теж переміщатиметься по екрану, відсуваючись або присуваючись до зондуючого імпульсу, що стоїть нерухомо. Так локатор «бачить» ціль, дає змогу визначити напрям і відстань до неї. І все це — в яку завгодно погоду, у будь-яку пору дня і ночі!

Народившись перед другою світовою війною, радіолокація бурхливо розвивається. Найширше застосовується вона для військових цілей. Сучасні станції далекого виявлення «бачать» літак, що летить високо, за 300—500 і навіть 1000 *км*. Станції самі роблять круговий огляд місцевості, і тоді на екрані можна бачити всі цілі навколо. З літака локатор «оглядає» землю, і на його екрані вирисовується «жива» карта місцевості. Гармата веде вогонь, а на екрані видно, як навколо цілі падають снаряди — недоліт чи переліт. Локатор може стежити за ціллю, може навіть наводити на неї керований снаряд. Локатор розміщають в головках артилерійських снарядів і ракет, і він підриває їх на заданій відстані від цілі.

Широко застосовується радіолокація в мирному житті, в народному господарстві. Локатор незамінний на кораблі, літаку, в обладнаннях аеродромів і портів. Його починають

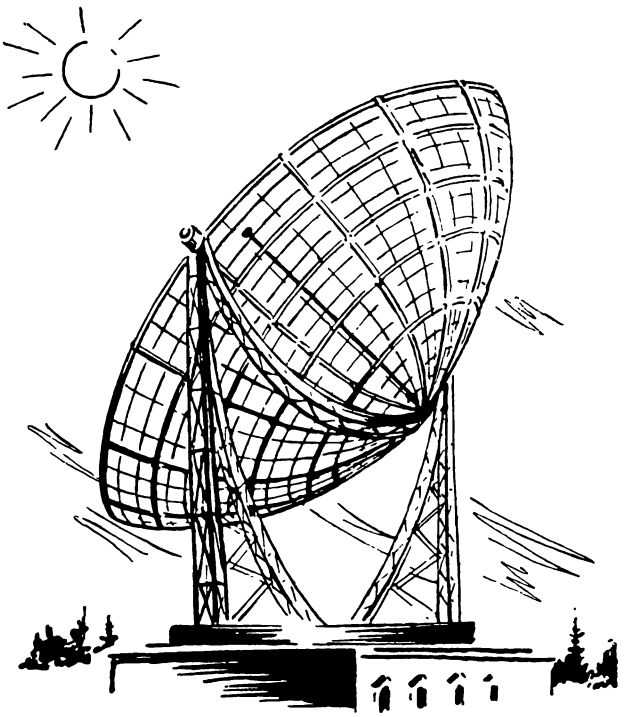


Локатор «бачить» ціль.

установлювати на автомобілях, на перехрестях вулиць...

Радіолокація розвивалася по шляху застосування дедалі коротших хвиль. Для цього треба було створити генератори ультрависоких частот, гостро спрямовані антени і розвинути імпульсну техніку. Досягнення і технічні можливості, що відкрились завдяки застосуванню радіолокаційних методів в астрономії, геодезії, навігації, спектроскопії, метеорології, в електричних лічильних машинах і в інших галузях, привели до зародження нових самостійних галузей науки, що базуються на радіометодах.

Одна з таких наук, яка цілком завдячує своєю появою радіолокації,— радіоспектроскопія — нова галузь радіофізики. Створені для цілей радіолокації клістронні генератори надвисоких частот виявились єдиними джерелами високочастотних коливань, придатними для спектроскопії. Основою радіоспектроскопії є радіотехнічний метод резонансного вбирання радіохвиль. Молекули кожної речовини, що перебуває в рідкому, газоподібному або твердому стані, являють собою коливальну систему з власною частотою резонансу. Частоти



Радіотелескоп.

ці для більшості речовин лежать в області надвисоких частот, в діапазоні сантиметрових і міліметрових хвиль. Якщо внести речовину в електромагнітне поле відповідної частоти, то саме при частоті резонансу кожний контур — молекула — почне в такт коливанням «відсисати» енергію з поля.

Змінюючи частоту біля резонансної і вимірюючи величину вбирання, можна детально дослідити речовину, проникати всередину її структури, вивчати її властивості.

За допомогою методів радіоспектроскопії було вперше виявлено радіовипромінювання міжзоряного водню на хвилі 21 *см*, було створено молекулярний годинник з абсолютно точним ходом, вивчено велику кількість хімічних сполук, проводиться швидкий якісний і кількісний аналіз сумішей газів, створюються молекулярні генератори і підсилювачі, освоюються генератори дедалі вищих частот, аж до частин міліметра. Це останнє дасть змогу перейти від локації до прямого бачення за допомогою радіохвиль.

Багато дечим зобов'язана радіолокації і р а д і о а с т р о н о м і я. Оператори військових локаторів, обшарюючи горизонт в шуканнях ворожих літаків, першими виявили радіовипромінювання Сонця, яке сприймалось як потужні завади. Незабаром з'ясувалось, що з багатьох ділянок неба йдуть невідомі радіохвилі різної довжини. Докладне їх вивчення відкрило нові можливості для проникнення в таємниці Всесвіту.

Антени радіотелескопів допомогли відкрити так звані радіозорі і вивчити космічні тіла та туманності, які зовсім не випромінюють видимого світла. Докладно вивчено корону Сонця, бо локатори дали можливість вивчати її регулярно, а не тільки під час повних сонячних затемнень (1—2 години на століття)! Те саме можна сказати і про вивчення метеорів, хвости яких можна було спостерігати тільки вночі і в ясну погоду. А радіовипромінювання міжзоряного газу дають такі відомості про Всесвіт, яких оптична астрономія дати взагалі не може.

Нові завдання постали перед радіоастрономією після запуску перших штучних супутників Землі. Радіоастрономічні телескопи, як правило, тільки приймають радіовипромінювання, але з появою в Космосі перших супутників Землі виникла необхідність в радіотелескопах-локаторах. Вони були збудовані і успішно ведуть спостереження за супутниками, опромінюючи їх радіоімпульсами і приймаючи відбиті луна-сигнали.

Крім розв'язання суто астрономічних завдань, радіоастрономія дає в руки вчених новий засіб вивчення земної атмосфери і фізичних процесів, що в ній відбуваються.

Радіоастрономія — дуже молода наука, але вона швидко розвивається і її значення у вивченні Всесвіту дедалі зростає. Дуже багато зробили для її розвитку радянські вчені В. А. Гінзбург і І. С. Шкловський.

Радіоелектроніка збагатила і стародавню науку про водіння кораблів по морях і океанах — н а в і г а ц і ю. В основу радіонавігації взято можливість створення спрямованих антен і визначення напряму приймання радіохвиль. Для навігації можна використати радіостанції будь-якого діапазону, навіть радіомовні. Проте величезну сітку морських і авіаційних трас, як правило, обслуговують спеціальні радіомаяки, по яких штурман упевнено визначає місцеположення і курс. Сучасні навігаційні системи дають змогу навіть при відсутності автопілота вести літак без льотчика.

Радіоелектроніка стала основою для створення сучасних швидкодіючих електронних обчислювальних машин. Основні їх вузли —

арифметичні пристрої — будуються на електронних лампах або на напівпровідникових приладах; в системах «пам'яті» застосовують радіолампові тригерні елементи і електронно-променеві трубки. А, як відомо, електронні машини застосовуються не тільки для трудомістких математичних обчислень, але і для керування в різних автоматичних системах.

Сучасна автоматика і телемеханіка в значній мірі базуються на досягненнях радіоелектроніки. Цілими енергосистемами ліній електропередач і електростанціями керують на відстані за допомогою радіосигналів; створюються автоматизовані лінії і навіть заводи, де «думаючі машини» контролюють, реєструють і спрямовують різні процеси виробництва.

Радіо і радіоелектроніка широко проникли в медицину. Виникла нова галузь медицини — р а д і о т е р а п і я, яка використовує властивості ультракоротких хвиль проникати крізь тканини тіла і впливати на них. Створено різноманітну апаратуру для радіодіагностики — розпізнавання хвороб за допомогою радіохвиль.

Спеціальні радіопідсилювачі дають змогу оглухлим знову добре чути. А для сліпих створено світлолокатори, за допомогою яких вони можуть «бачити» навколишні предмети.

Застосування радіоелектроніки справді безмежне. Електронні мікроскопи дали можливість проникнути в глибини мікросвіту, недоступні для звичайних оптичних мікроскопів. Високочастотне нагрівання дає можливість плавити метали, робити поверхневе гартування деталей і прискорювати процеси сушіння. За допомогою поля високої частоти можна передавати енергію на відстань і будувати ВЧ-мобілі, транспорт, який діставатиме енергію «по радіо». Коливаннями ультрависокої частоти винищують сільськогосподарських шкідників і прискорюють ріст рослин. Електролокатори можуть знаходити пошкодження в підземних кабелях. Радіокеровані і самонавідні ракети стоять на озброєнні армій. Напівпровідникові сонячні батареї літають у Космосі на третьому радянському супутнику Землі і на автоматичній міжпланетній станції.

Дальший розвиток радіоелектроніки обіцяє фантастичні технічні удосконалення і, безперечно, допоможе втілити в життя найсміливіші мрії людства.

НАПІВПРОВІДНИКИ

ПРОВІДНИКИ І ІЗОЛЯТОРИ

Напівпровідники... Хто не чув про ці чудові матеріали? Про них пишуть у газетах і журналах, їх показують у кіно і по телебаченню, про них згадують у радіопередачах. Що ж, напівпровідники заслужили такої пошани. Сіро-голубі, тьмяно виблискуючі кристали германію, кремнію, селену, незчисленні сплави, окисли привертають пильну увагу учених. Над напівпровідниками працюють хіміки і металурги, їх вивчають радіоінженери, конструктори автоматичних приладів, на них покладають надії світлотехніки, енергетики, лікарі; навіть фізіологи дедалі частіше говорять про них. Майбутнє науки і практики вирисовується тісно зв'язаним з цими речовинами, які мають таку скромну назву.

Що ж таке напівпровідники? Чому вони стали такими потрібними людині?

Шукаючи відповіді на ці питання, ми спочатку коротко розберемося у фізичній суті явища електропровідності.

Читач дуже добре знає два основні матеріали електротехніки — провідник і ізолятор. Мідний дріт добре проводить електричний струм, тому мідь, як і інші метали, називають провідником. А фарфоровий ролик або якийсь предмет із скла, гуми, ебоніту струму не пропускають. Це ізолятори. У чому фізичні причини відмінності провідників і ізоляторів?

Ви, звичайно, знаєте, що кожна речовина збудована з незчисленних міріадів атомів. Всякий атом складається з ядра, навколо якого обертаються електрони — легкі частинки, що несуть негативний заряд. І виявляється, що в провідниках і ізоляторах зовнішні, так звані валентні, електрони атомів, ті самі, що створюють хімічні зв'язки, поводяться неоднаково.

У металі атоми позбавлені валентних електронів. Ці електрони там не можуть держа-

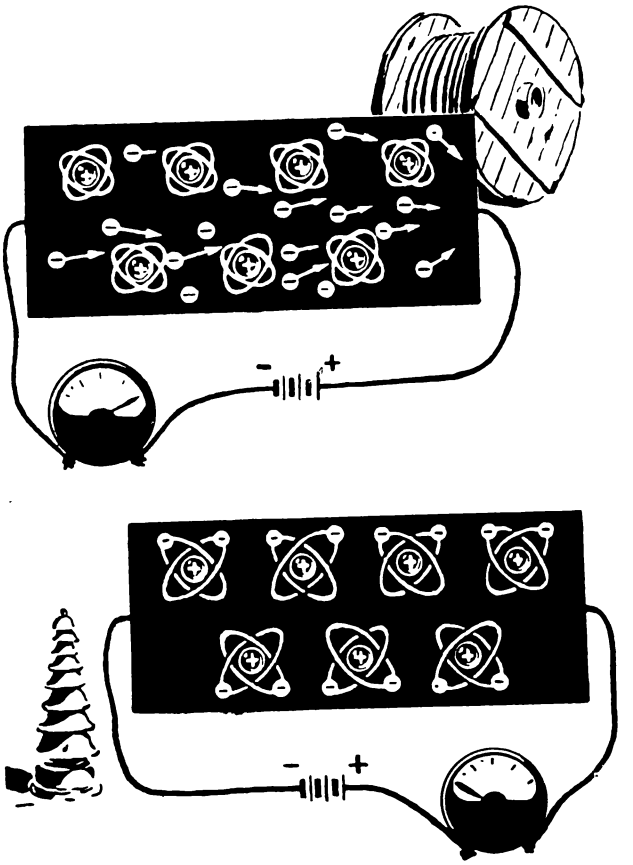


Рис. 1. Верхній рисунок дає уявлення про електропровідність металу. Валентні електрони не зв'язані з кожним атомом окремо, а рухаються між ними. Ці електрони здатні переносити електричний струм. На нижньому рисунку показано, як можна уявити собі структуру ізолятора. Валентні електрони там міцно держаться на атомах. А тому в ізоляторі нічому переносити електричний струм.

тися на атомах, зіскакують з них і вільно блукають всередині металу, утворюючи своєрідний електронний газ. Частинки його, правда, не можуть вийти з металу. Спільні зусилля позитивно заряджених атомів (іонів), що утворюють кістяк (кристалічну решітку) металу, надійно удержують електронний газ всередині металевого предмета[1]. Можна вважати, що валентні електрони там «усуспільнені», належать зразу всім атомам разом, а не кожному з них зокрема. Це і визначає високу електропровідність металів (рис. 1, зверху).

Досить притиснути металеву дротинку до полюсів електричної батареї, як частинки електронного газу підхоплюються електричним полем і прямують до позитивного полюса. По металу починає проходити електричний струм.

З шкільних дослідів читач, мабуть, пам'ятає, що при нагріванні провідника його електропровідність зменшується. Тому спіраль електричної плитки зразу після ввімкнення в сітку має значно менший опір, ніж коли розжариться до червоного. В цьому важлива фізична ознака провідників. Як її можна пояснити?

Ви вже знаєте, що електронний потік у металі пробивається через кристалічну решітку атомів, позбавлених валентних електронів. Але ж атоми не стоять нерухомо, вони коливаються. Чим вища температура, тим більші коливання решітки і, отже, тим важче пробиватися крізь неї електронному потоку. Така є в найкоротших рисах і дуже спрощено показана фізична суть електропровідності металів.

А що відбувається в ізоляторах?

У фарфоровому ролику, як і у всякому іншому ізоляторі, справа стоїть інакше. Електронного газу там немає, атоми міцно удержують свої валентні електрони (рис. 1, внизу). В ізоляторі нічому переносити струм. Правда, якщо дуже сильно розігріти ізолятор, його іноді все ж можна зробити електропровідним: при інтенсивному тепловому русі атоми почнуть втрачати валентні електрони, які і стануть носіями струму.

Напівпровідники ж займають проміжне місце між провідниками і ізоляторами.

ЕЛЕКТРОНИ В НАПІВПРОВІДНИКУ

При низькій температурі більшість електронів у напівпровідниках «сидить» на своїх місцях в атомах. Але зв'язані вони з атомами не дуже міцно. Беручи участь у тепловому русі, атоми розхитуються і втрачають зовнішні електрони. Ви нагріваєте напівпровідник і збільшуєте в ньому кількість електронного газу, тобто вільних електронів, здатних переносити електричний струм.

Значить, напівпровідник при нагріванні не зменшує, як метал, а, навпаки, збільшує свою електропровідність (рис. 2). В цьому полягає важлива фізична ознака всякого напівпровідникового матеріалу.

Характерна і інша особливість. Виявляється, в напівпровіднику переносять струм не

[1] Тільки при сильному нагріванні частинки електронного газу починають рухатися так швидко, що набувають здатності вириватися назовні з металу. Відбувається, як кажуть фізики, термоелектронна емісія.

тільки електрони, що відірвалися від атомів, а і ті, що лишаються зв'язаними з атомами.

Чому це відбувається?

Щоб знайти відповідь, простежимо за поведінкою електронів у кусочку напівпровідника, сполученого з полюсами електричної батареї.

Ось коливаються атоми кристалічної решітки. З них безперервно злітають електрони, які негайно підхоплюються електричним полем батареї і вилітають з неї. Проте в кожному атомі, що втратив електрон, лишається ніби вільне місце. І воно тільки якусь дуже коротку мить лишається пустим. Під впливом електричного поля на нього зразу ж переходить електрон з сусіднього атома. Не дістаючи цілковитої волі, цей електрон просто «міняє хазяїна», прагнучи при цьому рухатися туди, куди його притягає електричне поле батареї. Новозвільнене місце займає електрон із ще дальшого атома і т. д.

Словом, зв'язані електрони переміщаються по «вільних місцях» в атомах у напрямі до позитивного полюса батареї. Це створює значну добавку до струму через напівпровідник. А «вільні місця», або, як кажуть фізики, «дірки», тим часом перекочовують у протилежний бік.

«ДІРКИ»

Поняття «дірки», дуже важливе в теорії напівпровідників, варто пояснити простою аналогією.

Перед вожатим вишикувалась шеренга піонерів. Вожатий викликає одного піонера із строю і посилає його з якимсь дорученням. В шерензі утворилось незайняте місце — «дірка». Лунає команда: «Зімкнути стрій!». Піонери один по одному пересуваються до правого флангу, а дірка в строю крок за кроком відсувається до лівого флангу (рис. 3).

У напівпровіднику дірка поводиться подібно до пустого місця в шерензі піонерів. Коли по напівпровіднику проходить струм, вільні електрони і дірки біжать у протилежних напрямах. І ось що важливо: дірки рухаються так, як звичайні електрично заряджені частинки, що несуть заряд, який дорівнює електронному, але не негативний, а позитивний. Закономірності руху дірок такі, що цим «пустим місцям» фізики умовно приписують і так звану «ефективну масу» — вважають для зручності розрахунків, що дірки мають певну масу (трохи більшу, ніж у електронів, бо дірки не такі рухливі, як електрони).

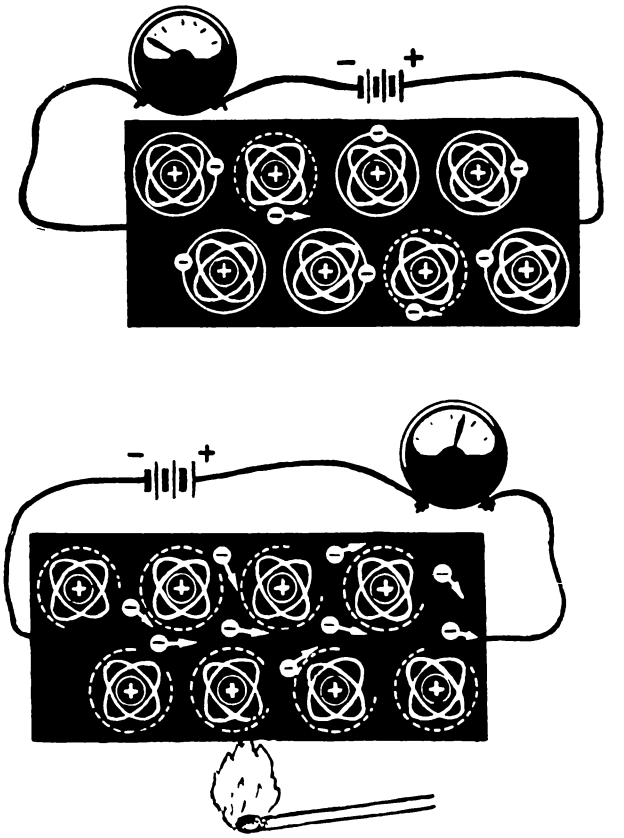


Рис. 2. Чим вища температура, тим краще напівпровідник проводить електричний струм. В цьому його важлива відмінність від провідника. Пояснюється це просто: від нагрівання дедалі більше валентних електронів відривається від атомів напівпровідника.

Виходить, що поведінка дірки в усьому подібна до поведінки матеріальної частинки з найменшим у природі позитивним зарядом, але трохи важчої, ніж електрон. Ця «частинка», як і вільний електрон, є у напівпровіднику носієм електричного струму.

Звичайно, треба пам'ятати, що дірка — поняття суто умовне. Це — зовсім не справжня частинка. Насправді в ній немає ні заряду, ні маси. Користуються поняттям «дірка» тільки для зручності, щоб уникнути складних і громіздких міркувань про рух електронів, зв'язаних з атомами.

Отже, будемо вважати, що в напівпровіднику є два види носіїв струму — електрони і дірки. З цим зв'язано багато явищ — не тільки електропровідність, але й, скажемо, світіння матеріалу, коли електрони знову з'єднуються з дірками, або своєрідна поведінка в магнітному полі.

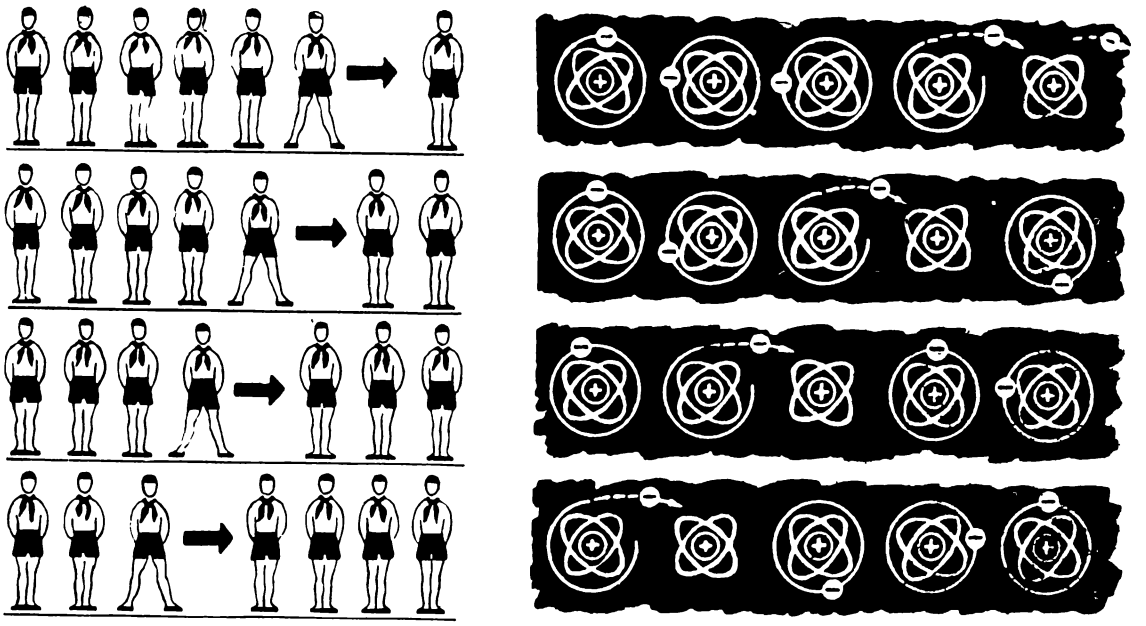


Рис. 3. В шерензі піонерів, коли стрій вмикається праворуч, пусте місце рухається справа наліво. В напівпровіднику приблизно так само «мандрує» не зайняте валентним електроном місце в атомі — дірка.

Якщо напівпровідник, по якому проходить струм, умістити в магнітне поле, то електрони й дірки відхиляються від прямого шляху і створюють різниці потенціалів у перпендикулярному напрямі. Це явище називають ефектом Холла. Реєструючи його, тобто фіксуючи «поперечну» електрорушійну силу в напівпровіднику, вміщеному в магнітне поле, вдається уловлювати щонайтонші зміни цього поля. Високою чутливістю напівпровідників до зміни магнітного поля користуються для створення ідеально точних компасів та інших приладів.

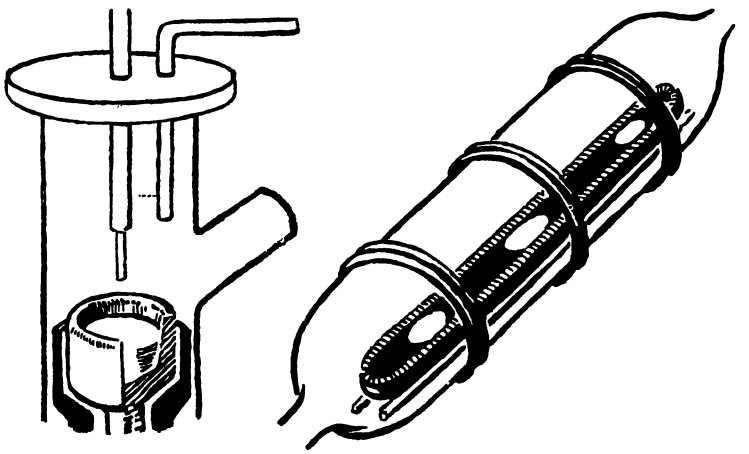


Рис. 4. Прилади для найвищого очищення напівпровідників. Ліворуч — установка для витягування чистих кристалів з розплавленого матеріалу. Праворуч — апарат для «зонної плавки» напівпровідників. Під впливом високочастотного поля напівпровідник розжарюється і плавиться, а потім область розплавленого матеріалу поступово просувається вперед. При цьому домішки ніби виштовхуються в розплав, і застигаюча частина матеріалу очищається.

ДВА ТИПИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Може здатися, що вільних електронів і дірок у напівпровіднику завжди повинна бути однакова кількість: скільки електронів зіскочить з атомів, стільки виникає і дірок. Але це буває тільки в абсолютно чистому напівпровіднику, вільному навіть від щонайменших домішок. Досить ввести в чистий напівпровідник зовсім невелику кількість іншого хімічного елементу, як появляється або надмір електронів, або надмір дірок. Наприклад, закис міді в присутності домішки міді збагачується на електрони, а в присутності «зайвого» кисню — на дірки. Пояснити це неважко. Атоми кисню

легко відтягують на себе електрони і створюють надмір дірок, тоді як атоми міді, навпаки, віддають свої електрони. Ті напівпровідники, в яких основними носіями струму є електрони, називаються електронними. А матеріали з надміром дірок називають дірковими напівпровідниками.

Виготовлення напівпровідників — справа дуже нелегка. Основна трудність полягає в очищенні матеріалів. Наприклад, напівпровідниковий кристалічний елемент германій потребує іноді настільки високого очищення, щоб на мільйон його атомів припадало не більше одного атома іншої речовини. Ще більшої чистоти вимагають фізики від кремнію — на мільярд атомів не більше одного чужого! Проте сучасна техніка не погано справляється з завданням найвищого очищення матеріалів. Для цього винайдено немало способів. Домішки, наприклад, «виганяють» спеціальною зонною плавкою. Під впливом високочастотного поля напівпровідник розжарюється і плавиться, а потім область розплавленого матеріалу поступово просувається вперед. При цьому домішки ніби виштовхуються в розплав. Вирощуючи з розплавів кристали, добувають очищені матеріали (рис. 4). В основі цих методів лежить відоме багатьом явище: кристал завжди чистіший від рідини, з якої його вирощують. З цієї причини, наприклад, лід, що утворився на поверхні моря, не такий солоний, як морська вода.

До багаторазово очищеного напівпровідникового матеріалу додають незначну кількість необхідних домішок. Так виготовляють діркові і електронні напівпровідники, в сотні і тисячі раз змінюють їх електропровідність, залежність провідності від зовнішніх впливів.

Можливість у широких межах керувати електричними властивостями напівпровідників відкриває їм незчисленні шляхи до практичної служби.

ТЕРМІСТОРИ

Найпростіша особливість напівпровідника— яскраво виявлена залежність його електропровідності від температури. Чим сильніше нагріто напівпровідниковий матеріал, тим у більшій кількості в ньому звільняються електрони і утворюються дірки, тим краще він проводить струм (рис. 5). І зразу ж напрошується думка робити на основі напівпровідників прості і надійні електротермометри. Їх називають звичайно термісторами.

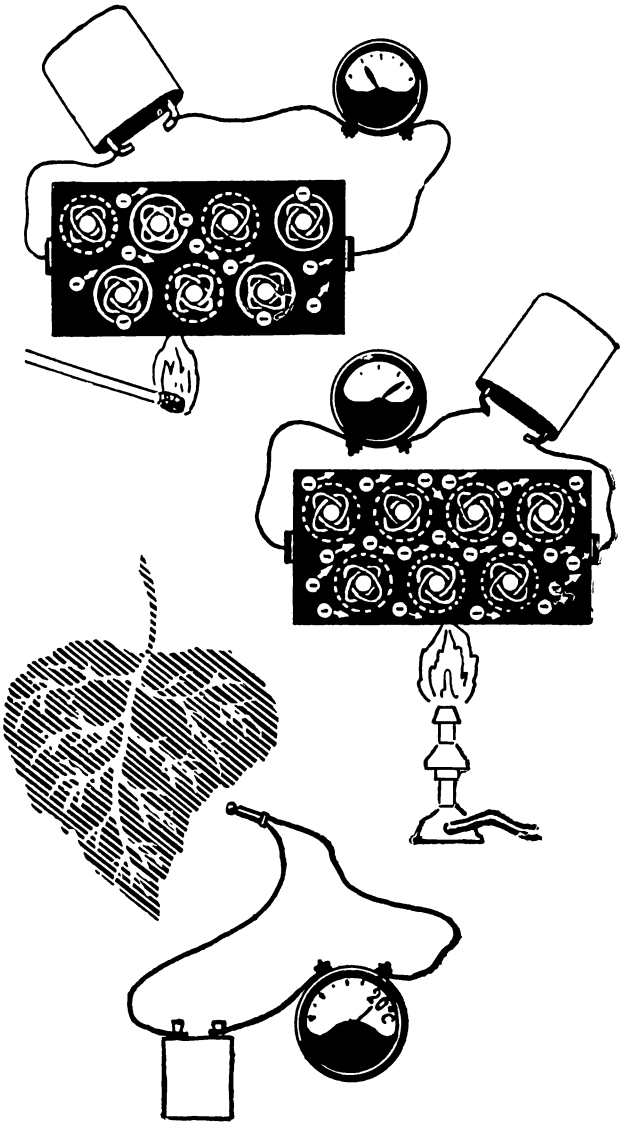


Рис. 5. Напівпровідник, нагрітий до різних температур, неоднаково добре проводить електричний струм. На цьому явищі побудовані різні напівпровідникові вимірники температури — електротермометри, або термістори.

Яких тільки термісторів тепер не побачиш на наших заводах, в науково-дослідних інститутах, колгоспах, лікарнях! Є, наприклад, багатометрові штанги, якими зручно перевіряти температуру десь у глибині наповненого зерном елеватора. Є термістори, що своїм виглядом нагадують кинджали. Їх встромляють у грунт, щоб дізнатися, наскільки прогрілись різні його шари. Мініатюрними напівпровідниковими електротермометрами агрономи точно

вимірюють ступінь нагріву поверхні листків рослин, а лікарі — температуру шкіри хворого.

Малюсінькі чутливі елементи термісторів можна вводити прямо у кровоносну судину. Інженери ставлять термістори в машини, щоб своєчасно мати попередження про надмірне розігрівання деталі. Дуже широко починають застосовуватися ці прилади в автоматиці, всюди, де треба підтримувати сталу температуру або зв'язані з нею фізичні величини (такі, як вологість, швидкість руху газів).

Чутливість деяких напівпровідникових термометрів така велика, що на їх основі будують спеціальні прилади — болометри, які можуть за кілька кілометрів уловлювати теплове випромінювання запаленої папіроси. Конструюють і різні автоматичні апарати, які на перший погляд не мають нічого спільного з температурою, наприклад, «реле часу». У цьому пристрої слабкий електричний струм, проходячи по напівпровіднику, розігріває його і одночасно підвищує його електропровідність з тим, щоб через деякий, заздалегідь заданий час увімкнути сильний струм, що живить, скажемо, якийсь двигун.

У всій цій різноманітності практичних застосувань використовується найпростіша властивість напівпровідників — велика залежність їх електропровідності від температури.

МАШИНИ ВІДЧУВАЮТЬ СВІТЛО

Напівпровідникові матеріали реагують не тільки на нагрівання або охолодження. Вони дуже добре «відчувають» і світло, і невидимі промені —інфрачервоні, ультрафіолетові, рентгенові. Такі зовнішні впливи здатні значно підвищувати електропровідність напівпровідника, викликаючи в ньому надмір носіїв струму — електронів і дірок.

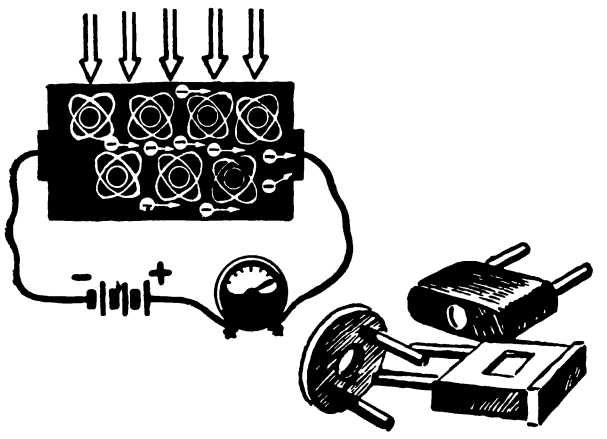


Рис. 6. Світло звільняє в напівпровіднику електрони. На цьому явищі побудовані прилади, що називаються фотоопорами. Міцні і мініатюрні, вони в багатьох випадках з успіхом заміняють ламкі вакуумні фотоелементи.

Давно вже перестали бути рідкістю міцні і мініатюрні напівпровідникові «очі» — фотоопори (рис. 6). Вони йдуть у техніку на зміну ламким і дорогим скляним вакуумним фотоелементам і надійно працюють у незчисленних автоматичних пристроях. Можна, наприклад, примусити падати на фотоопір тінь від деталей, що проходять по заводському конвейєру, і таким чином підраховувати кількість випущених виробів. Фотоопори уміють оцінювати якість шліфування, фарбування виробів, стоять на варті здоров'я і життя людей в апаратах техніки безпеки.

Досить робітникові випадково потрапити рукою в небезпечне місце машини, як на фотоопір падає тінь, і струм, що через нього проходить, припиняється, а це є командою для негайного автоматичного зупинення машини.

На застосуванні мініатюрних фотоопорів грунтується цікава «читаюча машина» для сліпих, створена в нашій країні. Її чутливий елемент, рухаючись уздовж рядка книги, уловлює обриси букв друкованого тексту. Створюються електричні сигнали. А вони перетворюються в рухи маленьких стерженців, які сліпий відчуває пальцями. Таким чином, він дістає можливість читати звичайні книги, а не тільки спеціальні, як це було досі.

Всевидющі напівпровідникові «очі» можуть мати дуже високу чутливість — в тисячі раз більшу, ніж у живого людського ока. Додайте до цього надійність і міцність фотоопорів — і ви зрозумієте, наскільки цінні ці прилади для техніки.

НАГРІВНИКИ І СВІТИЛЬНИКИ

Ми вже знаємо, що в напівпровідниках, як і в металах, енергія електричного струму може перетворюватись у тепло.

Уявіть собі електрокип'ятильник для води у вигляді невеликої трубки, яку надівають безпосередньо на водопровідний кран. Трубку зроблено із скла, на яке зсередини нанесено тонку плівку напівпровідника. Коли через плівку йде струм, напівпровідник дуже розігрівається і струмина води в трубці закипає. Ви відкриваєте кран, і через секунду з трубки ллється кип'яток.

Деякі напівпровідники під електричним впливом створюють яскраве світіння. Явище пояснюється просто: в таких напівпровідниках електричне поле викликає возз'єднання електронів з дірками. Електрони ніби «вплигують» на вільні місця в атомах і «провалюються» в дірки. Провалюючись, вони звільняють енергію, яка і виділяється у вигляді світла. На цій основі фізики створюють економічні, зручні світильники, плоскі телевізійні екрани (рис. 7) і багато іншого.

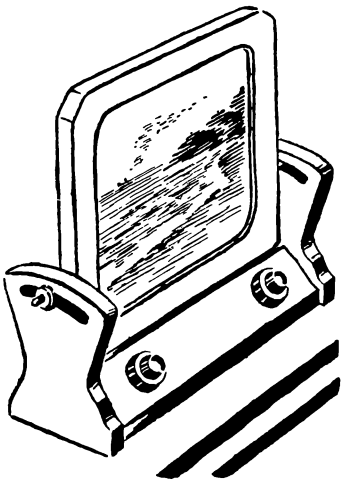


Рис. 7. Можливий вигляд плоского телевізійного екрана.

Інші напівпровідникові матеріали світяться і під такими впливами, як потоки електронів, рентгенових і ультрафіолетових променів. Такі речовини — дуже добре покриття для екранів рентгенівських установок, телевізійних трубок, ламп денного світла. Словом, люмінофори — світні матеріали, які в наші дні дедалі ширше входять у техніку і життя,—це не що інше, як напівпровідники.

З напівпровідників тепер роблять лічильники радіоактивних частинок, різні індикатори і покажчики, які світять безперервно протягом десятків років, живлячись енергією радіоактивного розпаду якоїсь речовини.

Є, нарешті, напівпровідники, які можуть ніби заряджатися світлом, а потім віддавати його по електричній «команді». І вся ця різноманітність практичних застосувань зв'язана з процесами взаємодії всередині напівпровідника електронів і дірок.

ЗАПІРНИЙ ШАР

Досі ми говорили про технічну службу напівпровідників якогось одного виду — або електронних, або діркових. Але, мабуть, ще цікавіші пристрої, в яких діють поєднання цих двох різновидностей напівпровідникових матеріалів.

Що відбувається з куском напівпровідника, в якому ніби зрослися два шари з різними домішками — електронний і дірковий?

З електронного шару в дірковий просуваються електрони, а з діркового в електронний — дірки. За межею поділу з діркового боку утворюється надмір електронів, а з електронного боку — надмір дірок. Кінець кінцем цих «порушників кордону» стане так багато, що вони перетворяться в своєрідних «прикордонників» — відштовхуватимуть нових порушників, що намагаються перейти кордон. Електронна «варта» не пустить своїх собратів з електронної області напівпровідника, а діркова «варта» закриє шлях діркам. Словом, на межі стикання двох видів напівпровідників виникне запірний шар, перебороти який без допомоги зовнішнього електричного поля носії струму не мають можливості. Цей запірний шар — основа багатьох найцінніших апаратів і приладів, створюваних на основі напівпровідникових матеріалів.

ВИПРЯМЛЯЧІ

Техніка наших днів широко користується в и п р я м л я ч а м и — пристроями, які перетворюють змінний електричний струм у постійний. Здебільшого це спеціальні радіолампи — кенотрони. Їх можна знайти в кожному сітковому радіоприймачі. Потужні випрямлячі для електросіток радіостанцій, електроплавильних печей, електровозів до недавнього часу робили тільки на основі приладів газового розряду, таких, як ртутні лампи, а також електромеханічних машин — мотор-генераторів. А це буває часом дуже незручно. Такі випрямлячі громіздкі (для потужного мотор-генератора будують цілий будинок), неекономічні, часто виходять з ладу. Можна собі уявити радість електротехніків, коли вони дізнались, що напівпровідниковий запірний шар відкрив можливість робити випрямлячі міцними, надійними, мініатюрними і разом з тим рекордно економічними.

У напівпровіднику, що складається з діркової і електронної областей, запірний шар являє собою ніби прикордонне електричне поле певного напряму. Якщо на такий шар іззовні накласти поле такого ж напряму, то воно ніби підсилить «варту» електронів і дірок — «прикордонників». Поле ж, спрямоване в протилежний бік, навпаки, змете цю «варту» — зруйнує запірний шар (рис. 8). А якщо підвести змінне поле, тобто те, що змінює напрям? Тоді запірний шар то розширятиметься,

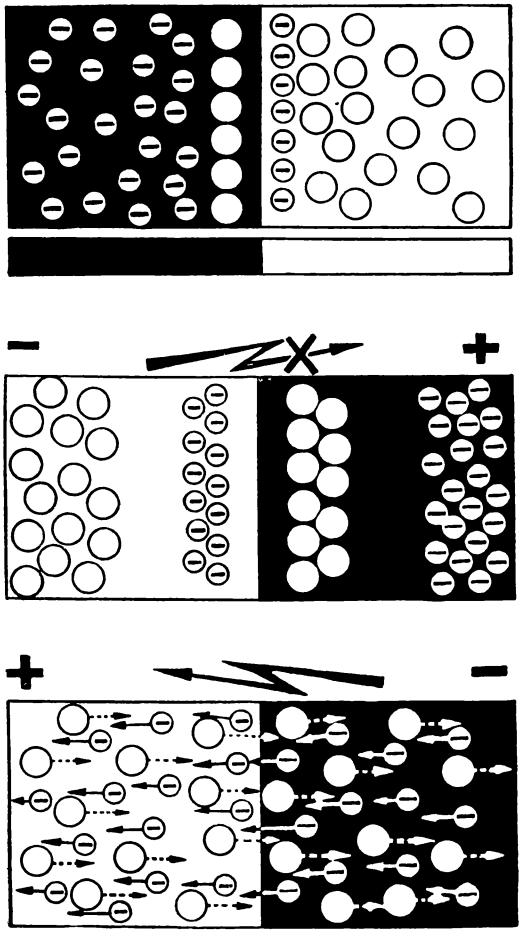


Рис. 8. На межі електронного і діркового напівпровідників виникає запірний шар. Він пропускає електричний струм тільки в тому напрямі, при якому електрони і дірки рухаються назустріч одне одному.

то зникатиме. В результаті під час розширення запірного шару струм через напівпровідник не піде, а в моменти зникнення — піде. Значить, наш двошаровий напівпровідник може відігравати роль випрямляча.

Купроксні (на закису міді) і селенові випрямлювальні пристрої вже давно знайшли своє місце в техніці. Тепер упевнено впроваджуються потужні випрямлячі з германію і кремнію. В найближчі роки вони в багатьох галузях техніки витіснять дорогі і ненадійні кенотрони, ртутні колби, мотор-генератори.

КРИСТАЛИ І ЛАМПИ

Варто відзначити, що найпростіший напівпровідниковий випрямляч був дуже поширений років 30—35 тому, на світанку розвитку радіомовлення. Йдеться про детектор — серце детекторного радіоприймача (рис. 9). Кристалик детектора перетворював швидкозмінні електричні коливання, уловлені антеною, у пульсуючі постійні струми, які в навушниках створювали звук.

Звичайно, в ті часи детектори працювали не дуже добре. Вмикаючи приймач, доводилось намацувати на кристалі дротинкою «чутливу точку», яка раз у раз збивалася. Поліпшенням детектора займалось багато винахідників. Серед них був співробітник Нижегородської радіолабораторії О. В. Лосєв. Поєднуючи в схемі два детектори, він навчився злегка підсилювати радіосигнали і збуджувати електричні коливання. Приймачі Лосєва—«кристадини»,— довгий час були популярними. Але потім, коли детектори поступилися місцем радіолампам, про кристадини забули.

Кілька десятиріч радіолампи неподільно володіли радіотехнікою. Освоюючи і вдосконалюючи ці прилади, радіотехніка добилася величезних успіхів. З їх участю розвинулись радіомовлення, телебачення, радіолокація, автоматика, телемеханіка. Появилась нова широка галузь знання — електроніка. Але поступово ставало ясно, що радіолампи далеко не бездоганні. Ламкі, недовговічні, неекономічні, вони дедалі менше задовольняли конструкторів. І тоді згадали про напівпровідниковий

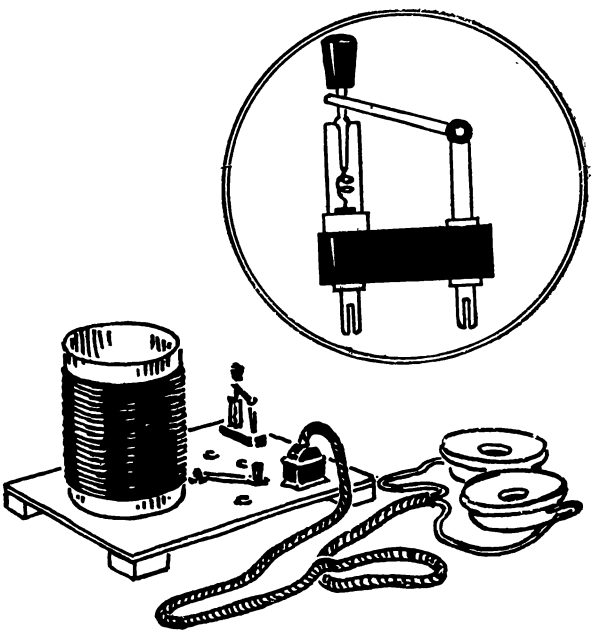


Рис. 9. Такий вигляд мають найпростіший детектор і складений на ньому детекторний приймач.

Рис. 10. Напівпровідникові радіоприлади неврівнянно менші за радіолампи.

детектор. Виникла ідея замінити твердим камінцем скляний пузир радіолампи.

Немало зусиль затратила наука, щоб «навчити» детектор нових «професій». Треба було створити поєднання напівпровідникових кристалів, здатне не тільки випрямляти струми, але й у широких межах підсилювати і генерувати електричні коливання. У 1948 р. проблему було розв'язано. Американці Бардін і Браттейн створили перший напівпровідниковий підсилювальний прилад — тріод. Теорію тріода розвинув їх співвітчизник Шоклі.

Як же збудований і діє напівпровідниковий замінник радіолампи (рис. 10)?

НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ТРІОД

Уявіть собі малюсінький кусочок електронного германію. На верхній грані його спеціальною обробкою створено область з дірковою провідністю. Між дірковою і електронною областями створюється, як завжди, запірний шар. Кристалик знизу припаяно до металевої пластинки — бази, а зверху до нього приєднано рядочком дві тонкі дротинки — емітер і колектор.

Підсилювані сигнали подаються до емітера і бази у «пропускному» напрямі запірного шару. І тоді в колі між базою і колектором, де ввімкнено порівняно високу постійну напругу в «забороненому» напрямі, виникають підсилені сигнали (рис. 11).

Чому це відбувається?

Коли подається сигнал, через дротинку емітера в діркову область напівпровідника заходить імпульс електричного поля. Він без завад прориває запірний шар, захоплюючи з собою дірки. Інакше кажучи, дірки ніби впорскуються в електронну область кристала. Недовго блукаючи там, вони потрапляють під дротинку колектора. І коли там запірний шар на мить збагачується на дірки, він стає електропровідним також для струму високої напруги, ввімкненого між базою і колектором. Користуючись зняттям «заборони», поштовх цього струму негайно проскакує між колектором і базою. У зовнішньому колі приладу виникає підсилений сигнал.

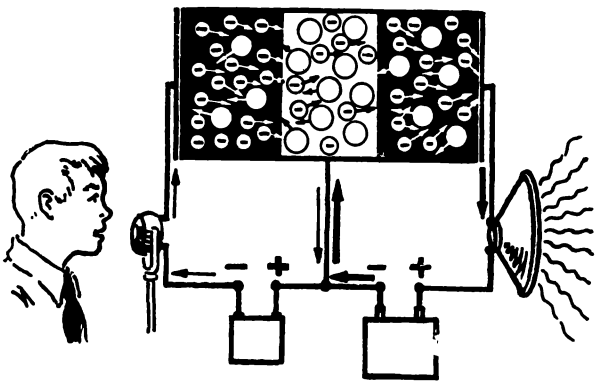


Рис. 11. Спрощена схема дії напівпровідникового тріода.

Така є коротко дія напівпровідникового тріода, який називають точковим (бо контакти емітера і колектора — точки). Є кристалічні підсилювачі і іншої системи — площинні. Вільні від щонайтонших дротинок, вони можуть підсилювати більші струми. Виготовляють також кристалічні тетроди, пентоди (прилади з чотирма і п'ятьма контактами), призначені для роботи з коливаннями високих частот.

Дедалі розширяється запровадження в практику цих чудових пристроїв, надійних, міцних, компактних, надзвичайно економічних у споживанні енергії. З приходом напівпровідників у радіотехніці відбувається справжній переворот.

НАДІЙНІСТЬ, МІНІАТЮРНІСТЬ

Обходячись без радіоламп, передавачі і приймачі вдається робити надзвичайно міцними. Їх можна змонтувати навіть у звичайному слюсарному молотку. Хоч скільки бий таким молотком, радіоапарати не зіпсуються, не перестануть працювати. Радіостанцію на кристалах можна вмонтувати в артилерійський снаряд, поставити на штучний супутник Землі, на міжпланетний корабель. Їй не страшні ні найсильніші струси, ні найрізкіші удари.

Дуже цінна і мініатюрність напівпровідникових радіоприладів. Уже тепер не рідкість приймач як портсигар завбільшки, навіть як сірникова коробка (рис. 12).

Читач, трохи знайомий з радіотехнікою, легко збудує мініатюрний напівпровідниковий радіоприймач. Або уявіть собі медичний «радіо-

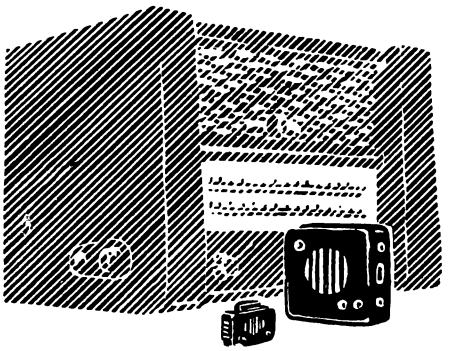


Рис. 12. Дедалі мініатюрнішими, компактнішими стають в приходом напівпровідників радіоприймачі. Уже стали не рідкістю радіоапарати, завбільшки як портсигар, навіть як коробка з-під сірників.

зонд» для дослідження внутрішніх органів людини — маленьку, як квасолина, «пілюлю», в якій заховано радіопередавач на кристаликах. Людина ковтає цю «пілюлю», і вона, блукаючи по кишечнику, методично посилає умовні радіосигнали про стан внутрішніх органів, їх температуру, тиск і т. д.

Величезну роль мають відіграти напівпровідники в електронно-обчислювальній техніці, що розвинулася за останні роки. Напочатку в кібернетичні машини доводилося ставити сотні і тисячі радіоламп, бо ці прилади «думали» саме за допомогою радіоламп. Зрозуміло, що займали вони великі кімнати, цілі зали, навіть окремі будинки, до того ж часто псувались, а в роботі споживали величезну кількість енергії. Але коли появились напівпровідники, електронні, лічильні і керувальні машини були швидко «переучені». Вони навчились «думати» з допомогою кристалічних тріодів та інших напівпровідникових деталей. Кібернетичний «мозок» зменшився в багато сотень раз. Енергії йому тепер треба зовсім небагато.

Тисячу напівпровідникових тріодів вчені зуміли вмістити в об'єм сірникової коробки. Тисячоламповий приймач — у вас на долоні!

МАЙБУТНЄ РАДІОТЕХНІКИ

Для мініатюрних радіоприладів на кристалах винайдено і відповідні їм малюсінькі джерела живлення, наприклад, батарейки, як трикопієчна монета завбільшки. Завдяки скромності «апетиту» напівпровідників, такої батарейки їм вистачає на кілька місяців. Будуються радіопередавачі, в яких джерелом енергії є той звук, що передається. Людина говорить у мікрофон, акустичні коливання перетворюються в імпульси струму: одна частина їх іде на підсилення, а друга — згладжується і живить підсилювач енергії. Весь передавач уміщується в корпусі мікрофона. Запропоновано використати для живлення радіоприймачів і навіть радіопередавачів на напівпровідниках енергію радіохвиль. Якщо приймач настроєно на якусь радіостанцію, то енергія радіохвиль іншої радіостанції, що в цей час працює, теж уловлюється, але не підсилюється, а живить кристалічні тріоди підсилювача.

Кожний день приносить нові вісті про вдосконалення кристалічних замінників радіоламп, про поліпшення щонайскладнішої, ювелірної технології їх виробництва, про зміну самих принципів їх роботи. Фізики запропонували, наприклад, занурювати напівпровідникові підсилювачі у рідкий гелій. Там при наднизькій температурі дія приладів набула небувалої точності і чистоти.

Переворот у радіотехніці викликається не тільки германієвими і кремнієвими приладами. Добру службу починають служити легкі магнітні напівпровідникові матеріали — ферити, з яких роблять, наприклад, антени як олівець завбільшки. Входять у практику запропоновані радянським фізиком Б. М. Вулом титанати барію, які ведуть до різкого зменшення розмірів і до нових можливостей застосування таких деталей, як конденсатори. Є надія, що з феритових пластинок з «латками» з титанатів барію незабаром можна буде ніби друкувати радіоприймачі — як листівки або поштові марки.

Безперечно, досягнення напівпровідникової радіотехніки дуже великі. Але було б неправильно думати, що кристалічні прилади ворогують з електронно-вакуумними пристроями. У тих і тих лишаються свої позитивні якості, які визначають різні шляхи їх дальшого розвитку. Кристалічні тріоди, на відміну від радіоламп, дуже важко виготовляти без «розкиду параметрів», так, щоб за своїми електричними характеристиками всі вони були точно однакові.

Крім того, германієві діоди і тріоди не виносять різких змін температури (цієї хиби, правда, майже немає у кремнієвих приладів). Нарешті, потужність кристалічних підсилювачів хоч і зростає з кожним роком, але ще дуже поступається перед потужністю радіоламп.

Показово, що напівпровідники роблять немало послуг вакуумній електроніці: з них роблять ефективні джерела електронів для радіоламп, пристрої, що запалюють розряд у ртутних випрямлячах, і т. д. Словом, не конкуренція, а ділове змагання, тісне співробітництво розгортаються зараз між технікою напівпровідників і вакуумною електронікою.

ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ З ТЕПЛА

Найважливішою особливістю напівпровідників є надзвичайна багатогранність їх можливостей. Мало того, що, наприклад, радіоприймач може діяти на кристалічних тріодах. Виявляється, і живлення йому можуть давати напівпровідники.

У далеких селищах і селах, у будинках лісників і бакенщиків зараз часто можна побачити своєрідну гасову лампу-електростанцію, яка не тільки світить, але й дає електричну енергію радіоприймачеві. Секрет пристрою досить простий. Спеціально виготовлені напівпровідникові брусочки змонтовані у вигляді трубки, яку надівають на вкорочене лампове скло. Коли лампа горить, зсередини торці цих брусочків розігріваються від тепла гарячих газів, що піднімаються від полум'я, а зовнішні їх кінці охолоджуються через радіатор кімнатним повітрям. І в результаті в напівпровідниковій батареї виникає електрична енергія. Чому?

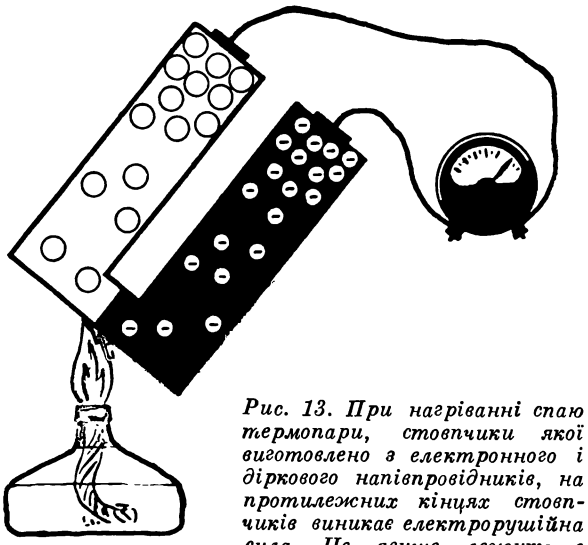


Рис. 13. При нагріванні спаю термопари, стовпчики якої виготовлено з електронного і діркового напівпровідників, на протилежних кінцях стовпчиків виникає електрорушійна сила. Це явище лежить в основі термоелектрогенераторів — приладів, які безпосередньо перетворюють тепло в енергію електричного струму.

Батарея складається з брусочків двох типів — електронних і діркових. Тих і тих — однакова кількість, і всі вони сполучені парами. В кожній парі — різні напівпровідники, спаяні металевою пластинкою, накладеною на торці. Виходить щось подібне до букви «П» (рис. 13). Пригадаємо тепер, що місце спаю нагрівається, а протилежні кінці брусочків охолоджуються. Нагрівання створює надмір носіїв струму, причому в різних напівпровідниках — різного знака. В електронному брусочку звільняються електрони, а в дірковому — дірки. І з нагрітих кінців брусків, де виникає ніби «штовханина» носіїв струму, вони перекочовують у холодні кінці, де «спокійніше». В результаті в холодному кінці діркового брусочка виникає позитивний заряд, а в холодному кінці електронного брусочка — негативний. Сполучіть їх дротинкою, і по ній піде струм, збуджений теплом.

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРІВ

Напівпровідникові термоелектрогенератори будуть дуже корисними для техніки. Справді, вдумайтесь, яка суть цих приладів? Тепло в них перетворюється в електроенергію зразу, безпосередньо — зовсім не так, як, скажемо, на сучасних теплових електростанціях, де працюють парові котли, турбіни, електрогенератори. У напівпровідникових термобатареях нема ніяких проміжних перетворень енергії, ніяких рухомих частин. Як привабно було б ставити великі батареї напівпровідників безпосередньо в топки електростанцій!

Однак у наші дні такі пристрої застосовуються тільки в маленьких приладах, таких, як гасова лампа, про яку ви читали (рис. 14). Справа в тому, що економічністю вони поки що поступаються перед звичайними способами вироблення електроенергії. Коефіцієнт корисної дії термопари становить 6—8%, а в лабораторних умовах — близько 10%. Це, взагалі кажучи, немало. Приблизно такий самий к. к. д. паровоза. Але все ж це в кілька разів менше від к. к. д. сучасних теплових електростанцій.

Фізика прагне тепер удосконалити напівпровідникові термоелектрогенератори — підвищити їх потужність і економічність.

Проте і в теперішньому вигляді їх можна використовувати досить широко. Ці прилади можна застосовувати всюди, де стоїть завдання

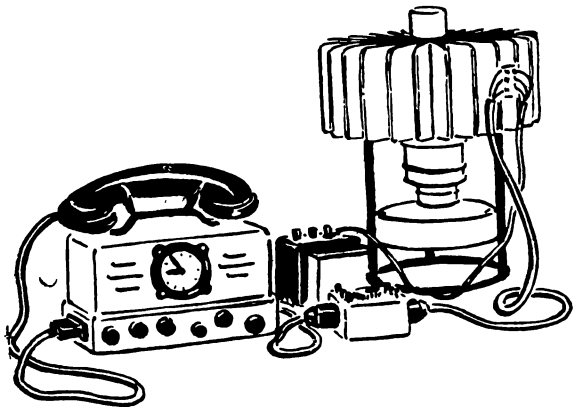


Рис. 14. Термоелектрогенератор на гасовій лампі. Прилад живить енергією колгоспну радіостанцію «Урожай».

освоєння так званого низькопотенціального тепла, тобто тепла, що міститься в масах речовини з порівняно невисокою температурою: в димі заводських труб, у відхідних водах заводів. Значна кількість цього тепла, яке тепер марно пропадає, з допомогою напівпровідників можна перетворювати в електроенергію. Деякі роботи в цьому напрямі уже провадяться. Наприклад, створено термоелектрогенератор, що виробляє електричний струм з тепла вихлопних газів автомобільного двигуна. Ця енергія зразу ж іде на підзаряджання акумуляторів.

НОВІ ХОЛОДИЛЬНИКИ

З брусочками напівпровідникових термопар можна робити дивні на перший погляд перетворення. Ми нагріваємо і охолоджуємо їх з різних боків, і вони створюють електроенергію. А що коли просто пропустити через них електричний струм? Тоді вони з одного боку нагріються, а з другого — охолодяться. Це зрозуміло. Зовнішнє електричне поле перерозподілить електрони і дірки, ніби «розтягне» їх у різні місця. Там, де виникне недостача носіїв струму, вони почнуть утворюватися заново, беручи на це енергію з навколишнього середовища і тим самим охолоджуючи його. Навпаки, всюди, де носіїв струму буде надмірна кількість і електрони возз'єднуватимуться з дірками, енергія почне виділятися у вигляді тепла. Таким чином, завдяки появі в брусочках місць з надміром і недостачею носіїв струму виникає різниця температур.

На цій основі в Інституті напівпровідників Академії наук СРСР під керівництвом акад. А. Ф. Йоффе розроблено кілька систем холодильників. В них ви не знайдете ніяких рухомих рідин, ніяких моторів і компресорів. В задню стінку холодильної шафи вмонтовано невелику плитку, складену з напівпровідникових термопар. Вона стикається з радіатором, що виходить своїми пластинами назовні і всередину, а напівпровідниковий випрямляч перетворює сітковий струм із змінного в постійний, який і йде на живлення холодильника. Оце і все. Холодильник діє, зовсім не зношуючись, а економічністю останні моделі цих пристроїв майже не поступаються перед звичайними холодильними установками. Тепер напівпровідникові холодильники успішно діють на борту кількох літаків ТУ-104.

Здатність напівпровідників створювати штучний холод пригодиться, звичайно, не тільки в побуті. Для наукових досліджень створено холодильники-малятка, як наперсток завбільшки. Ніяким іншим способом збудувати їх неможливо. Лікарі сподіваються, що фізики дадуть холодильний напівпровідниковий пластир, навіть охолодний пристрій, який можна було б вводити безпосередньо у людське тіло. Все це під силу техніці наших днів.

НАГРІВАННЯ РАЗОМ З ОХОЛОДЖЕННЯМ

Досить змінити напрям струму через напівпровідникову батарею — і холодильник наче «вивертається навиворіт». Там, де була недостача носіїв струму, тепер надлишок, і навпаки. Тепло і холод міняються місцями (рис. 15). Гріються вже не зовнішні, а внутрішні кінці напівпровідникових брусочків. Холодильник перетворюється в духову шафу. Звичайно, і цю можливість, абсолютно недоступну звичайним холодильним апаратам, техніка охоче використовує всюди, де треба підтримувати сталу температуру, навперемінно розігрівати і охолоджувати якусь деталь і т. д. Наприклад, германієві напівпровідникові тріоди погано переносять зміни температури, тому їх корисно вміщувати у напівпровідникові ж термостати.

Або ще одна цікава можливість — напівпровідникова опалювально-охолодна система для будинків.

Зайшовши у жилий будинок недалекого майбутнього, ви помітите в кімнатах під підвіконниками широкі пластини радіатора. Але це не центральне опалення. Такі самі плас-

тини ви помітите і з зовнішньої сторони стін. А між радіаторами — батареї напівпровідникових термопар. Пропускаючи через них постійний струм у певному напрямі, ми примушуємо кімнатний радіатор нагріватися. Так житло опалюється. А влітку, у спеку, струм вмикається у зворотному напрямі. Тепер кімнатний радіатор вбирає тепло навколишнього повітря і охолоджує приміщення.

Ця система проста, надійна, гігієнічна. Але, мабуть, основна її цінність — у великій економічності. Виявляється, кімната почне обігріватися не тільки за рахунок енергії електричного струму, що пропускається через напівпровідники. В якійсь мірі опаленню допоможе охолодження і без того холодного надвірного повітря. Адже воно теж «працюватиме», віддаючи своє тепло зовнішньому радіаторові. Правда, у великі морози «перекидання» тепла знадвору всередину будинку буде незначне. Але при порівняно теплій погоді цей напівпровідниковий «тепловий насос» може бути дуже корисним. Перший опалювально-охолодний напівпровідниковий агрегат уже створено в Москві на заводі «Сантехніка».

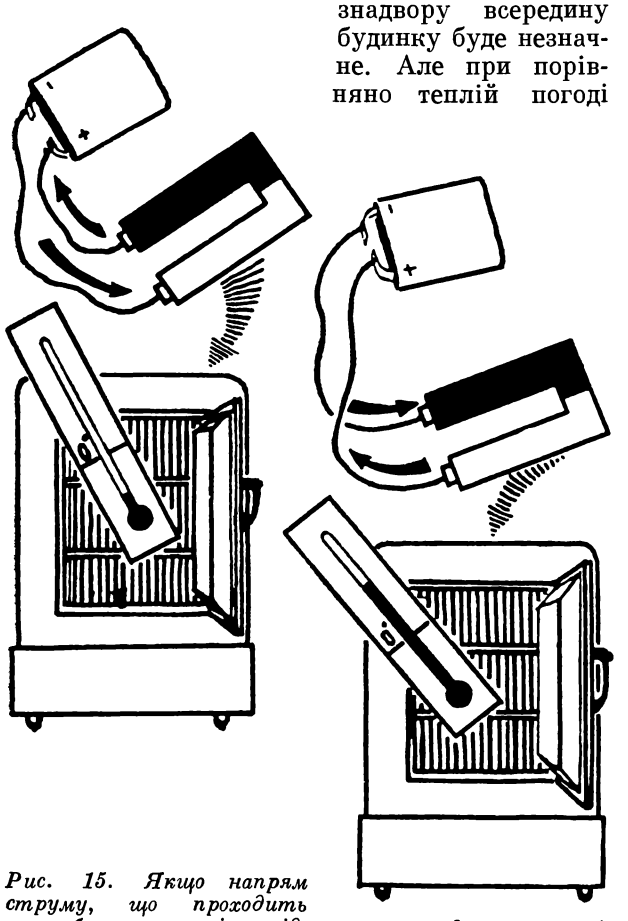


Рис. 15. Якщо напрям струму, що проходить через батарею напівпровідникового холодильника, змінити на протилежний, то холодильник ніби «вивертається навиворіт». У його шафі температура підвищується, а вовні, навпаки, знижується.

Отже, напівпровідники перетворюють тепло в електроенергію. Не менш ефективно вони можуть перетворювати в електричну енергію і світло.

ВЕНТИЛЬНИЙ ФОТОЕЛЕМЕНТ

Серед наших читачів, безперечно, є чимало фотолюбителів, а серед них є багато знайомих із зручним приладом для визначення експозицій під час знімання — з фотоелектричним експонометром. Ви відкриваєте кришку приладу, спрямовуєте його «око» на предмет, який хочете сфотографувати, і стрілка на шкалі тут же показує, яку треба зробити видержку. Прилад цікавий тим, що не потребує ніяких джерел живлення: батарейок, акумуляторів. Він перетворює світлову енергію в енергію електричного струму, який відхиляє стрілку. Світло перетворюється в струм.

Чутливий елемент експонометра зроблено з напівпровідника селену, що має діркову провідність. Він лежить на стальній підкладці. На поверхні ж селену теж нанесено тонку плівку металу, наприклад, золота. І ця домішка перетворює поверхневу область напівпровідника з діркової в електронну (рис. 16).

Що відбувається під впливом світла?

В електронній області «обстріл» світловими частинками (фотонами) звільняє з «полону» атомів нові електрони. Вони метушаться, ударяються і, «не вміщаючись» у тоненькому шарі електронного селену, переходять у плівку золота. Іншого шляху у них немає, бо в діркову область шлях закриває запірний шар. Тому в плівці золота нагромаджується надмір електронів — негативний електричний заряд. Разом з електронами в електронній області, природно, утворюється і деяка кількість дірок. Для них запірний шар не перешкода. Позитивний заряд — ніби «перепустка» для проходу через кордон. І завдяки цьому на стальній підкладці виникає позитивний заряд. Як бачите, енергія світла пішла на створення різниці потенціалів між протилежними поверхнями нашого напівпровідникового приладу. Сполучивши їх дротинкою, ми добудемо електричний струм, який проходитиме, поки селен освітлено.

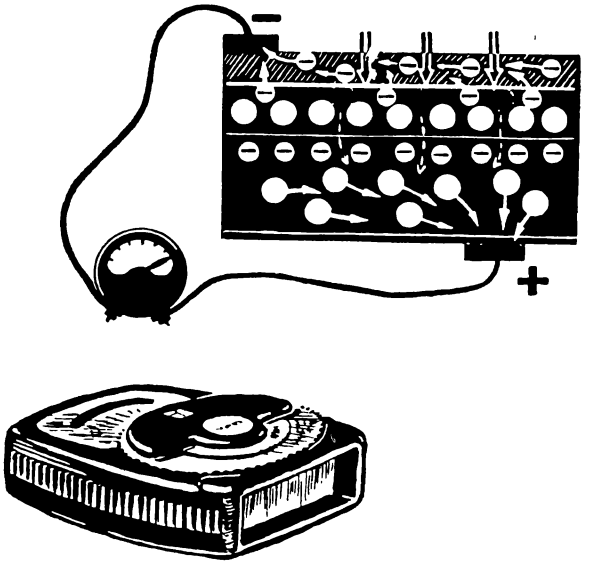


Рис. 16. Спрощена схема вентильного напівпровідникового фотоелемента. Вгорі — тонка плівка металу, нижче — область електронної провідності. Далі йде запірний шар, область діркової провідності і металева підкладка. Електрони, звільнені світлом в області електронної провідності, відходять у верхню плівку металу, а дірки вільно проникають крізь запірний шар і йдуть на металеву підкладку. Так між двома протилежними поверхнями фотоелемента виникає електрорушійна сила. Енергія світла перетворюється в електричну енергію. В фотоелектричному експонометрі, знайомому кожному фотографові-любителю, відбувається саме це явище.

Такі вентильні, за термінологією фізиків, фотоелементи відомі вже досить давно. Їх широко застосовують у різних автоматичних пристроях. Наприклад, напівпровідникові вентильні фотоелементи дуже добре справляються з аналізом крові (фіксуючи зовсім не значні відмінності в кількості червонокрівців), безперервно стежать за насиченістю крові киснем під час хірургічних операцій і т. д. Проте до недавнього часу хибою напівпровідникових фотоелементів був дуже низький коефіцієнт корисної дії — вони перетворювали в електричну енергію тільки тисячні частини енергії світлового потоку.

СВІТЛО ПРАЦЮЄ

Кілька років тому становище в цій галузі різко змінилося на краще. З великих, спеціально вирощених кристалів напівпровідника кремнію, поділених на тонкі пластинки, вдалось створити фотоелементи, здатні перетворювати в електричний струм до 13% енергії світла, що на них падає. Квадратний метр поверхні, освітленої сонцем, може дати до 120 *вт* електроенергії. Це — величезний успіх. Судіть самі: батарея кремнієвих фотоелементів площею в половину газетної сторінки в сонячний день може живити стандартний електродвигун швейної машини.

Незважаючи на трудність очищення і обробки кристалів кремнію, вентильні кремнієві фотоелементи упевнено впроваджуються в техніку. Радянські конструктори створили, наприклад, мініатюрний напівпровідниковий радіоприймач «Супутник», що живиться енергією від сонячної батареї. За кордоном випускають годинники, що «заводяться» світлом, фото- і кіноапарати, які самі не тільки вгадують експозицію, але й «сонячною силою» встановлюють потрібну діафрагму.

У США сонячні батареї живлять енергією телефонні підстанції. Збудовано моделі механізмів зрошувальних систем, «сонцемобілів» і суден, що використовують енергію сонячного проміння. Уявіть собі екіпаж, який рухається без всякого пального тільки тому, що освітлений сонцем. Правда, такі наземні транспортні засоби навряд чи скільки-небудь поширяться. Потужність сонячного випромінювання для них все-таки мала. Але, скажемо, річкові баржі, що мають велику поверхню, цілком могли б рухатися за рахунок енергії сонячного проміння.

У наземному транспорті сонячні батареї будуть, очевидно, додатковими і аварійними джерелами енергії. Якщо в електромобілі вичерпаються акумулятори, то до зарядної станції він «дотягне» на сонячному промінні, що вловлюється дахом-фотоелементом. До того ж на кожній денній стоянці такий екіпаж безперервно набиратиме енергію у власні акумулятори.

ДО СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Особливо велика цінність напівпровідникових «пасток світла» для потреб енергетики, яку звичайно називають «малою». Сонячні батареї (рис. 17) створюватимуть достаток енергії в неелектрифікованих районах — в горах, на островах, у тайзі — всюди, куди важко тягти лінію електропередачі, а будувати елек-

тростанції невигідно. Підраховано, що коли на даху будинку розмістити сонячні фотоелементи, то вони забезпечать енергією і опалювальні електропечі, і кухонні плити, і освітлювальні прилади — словом, усі побутові потреби. Вдень енергія збиратиметься в акумуляторах на темну пору доби. А як добре було б зробити сонячні фотоелементи у вигляді тканини, що скручується в рулон! На привалі геолог або турист розмотає такий килимок, розкладе його — і готова електростанція. Можна ввімкнути електроплитку, мініатюрний напівпровідниковий холодильник або, наприклад, обігріти повітря в наметі.

На третьому радянському штучному супутнику Землі і на автоматичній міжпланетній станції сонячні батареї дають електричний струм радіостанціям та іншим приладам літаючих космічних лабораторій. Це — зримий передвісник широкого використання вентильних фотоелементів на міжпланетних кораблях майбутнього. Світло не треба брати з Землі. Рухаючись до Марса, Венери, Меркурія, ракета полетить перед Сонцем, яке ніколи не заходить, купаючись у його потужному світловому потоці. І навіть при теперішньому коефіцієнті корисної дії сонячних батарей застосування їх на десятки тонн зменшить вагу космічного корабля.

Слід відзначити, що сучасні кремнієві фотоелементи, очевидно, ще не найефективніші. Працюють над їх удосконаленням і, головне, шукають нові матеріали, здатні освоїти більшу частку світлової енергії, ніж кремній. Теоретично можливе створення напівпровідникових сонячних батарей, що перетворюють в електричний струм майже половину енергії світла, яке на них падає.

НАПІВПРОВІДНИКИ І ЖИТТЯ

Народження сонячної енергетики — початок нового етапу в історії техніки.

До недавнього часу тільки рослини могли затримувати, нагромаджувати і використовувати енергію сонячного променя. Всі запаси викопного палива кінець кінцем — «консерви Сонця», заготовлені колись зеленими листками давніх рослин. З допомогою напівпровідників людина позбавила природу цієї монополії.

Між іншим, в зеленому листку, як виясняється, відбуваються явища, дуже схожі на ті, які проходять у вентильних фотоелементах. Сьогодні у лабораторіях з допомогою забарвлених напівпровідників уже здійснено перший етап фотосинтезу — знаменитого процесу нагромадження сонячної енергії, який перетворює світло в хімічну енергію живої речовини зеленого листка, процесу, який живить усе органічне життя Землі. І перед наукою тепер відкрилась принадна перспектива—здійснити штучний фотосинтез. Виникає завдання навчитися швидко виготовляти під впливом світла складні органічні сполуки безпосередньо з вуглекислого газу і води, проминувши природну лабораторію рослин. Успіхи фізики напівпровідників разом з досягненнями хімії та біології ведуть упевнено до розв'язання цієї проблеми.

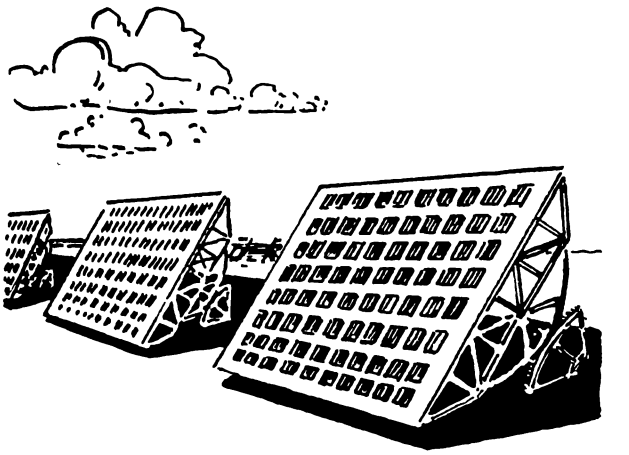
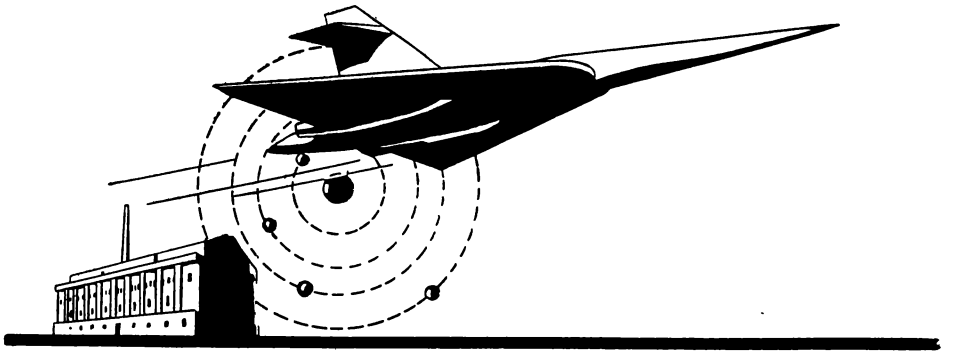


Рис. 17. Можливо, такий вигляд матимуть батареї сонячної електростанції.

Фізика напівпровідників і в інших галузях тісно зв'язана з наукою про життя. Електронні явища, подібні до процесів у запірних шарах, відіграють величезну роль у фізіології нервової системи, а процеси, подібні до вентильного фотоефекту,— у фізіології зору.

Характерно, що напівпровідники бувають не тільки кристалічні, а й скловидні і рідкі. Тому не дивно, що вони набувають великого значення для хімії. Відоме явище каталізу, коли малі домішки тих чи інших речовин різко прискорюють хід хімічних перетворень, виявляється, можна пояснити впливом домішок на електронні напівпровідникові процеси. В біохімічних реакціях каталізаторами служать складні органічні речовини, що називаються ферментами, причому жива тканина автоматично регулює їх склад і стан. Так наш організм керує різними життєвими процесами.

Надзвичайно широкий діапазон вчення про напівпровідники. Оволодіваючи ними, людина збагачує фізику і хімію, веде до нових висот техніку, розкриває віковічні загадки біології. Недарма у контрольних цифрах семирічного плану, прийнятих на позачерговому XXI з'їзді КПРС, напівпровідники названо в числі найважливіших наукових проблем. Сьогодні навіть важко уявити в повній мірі наслідки майбутнього розвитку фізики напівпровідників. З кожним роком ці чудові матеріали міцніше входитимуть в наше життя.



Ядерна енергія

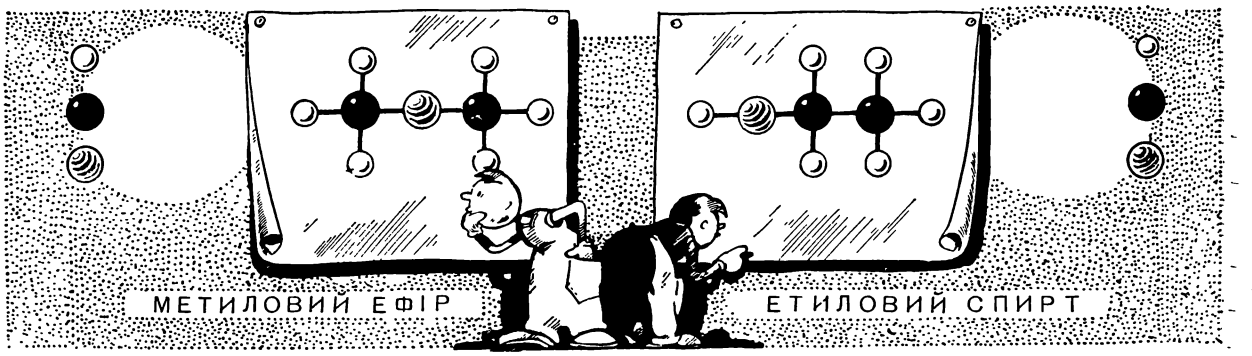
БУДОВА АТОМА І АТОМНА ЕНЕРГІЯ

Безліч різноманітних речовин оточує нас. Ми бачимо навколо незчисленну кількість не схожих один на одного предметів, різних рідин; зустрічаємось і з газами. Вони входять до складу повітря, яким ми дихаємо.

Ті дані, які має сучасна наука про будову речовини, настільки незвичайні для непідготовленого читача, що здаються просто неймовірними. Наприклад, «пустоти» в будь-яких тілах більше, ніж власне речовини (у звичайному розумінні цього слова), зосередженої в молекулах. Молекули — це найдрібніші частинки речовини. Вони бувають дуже різні щодо складу і маси.

Якщо в думці ділити речовину, то кінець кінцем ми доберемося до малюсінької частки її — молекули. Ця крихітка зберігатиме всі хімічні властивості речовини. Правда, про деякі властивості її важко говорити. Можна твердити, що у цукру вона солодка, а в солі — солона. Але хто пробував на смак одну молекулу!

Побачити молекули досить важко. Деякі з них удалось розгледіти зовсім недавно. Цьому допомогли новітні складні прилади — електронні та іонні мікроскопи. Ми говоримо про молекули, не усвідомлюючи того, які вони малі порівняно з найменшими предметами, що ми їх бачимо. Ми вважаємо найдрібнішим предметом пилинку, що літає в повітрі. Але вона — Ельбрус порівняно з молекулою. В нашому повсякденному житті не знайдеться нічого, що можна було б порівняти величиною з цією частинкою.



Склад один, а молекули різні.

Молекули надзвичайно різноманітні не тільки властивостями, але й розмірами. Молекули більшості речовин, що нас оточують (кисню і азоту, з яких складається повітря, кремнезему і вапна, з яких збудовані наші будинки, води, солі, яку ми додаємо до страви, і багатьох, багатьох інших), такі малі, що навіть на зрізі людської волосини їх умістилося б кілька мільйонів штук.

Проте є в цьому світі карликів і свої «велетні». Звичайно, і вони незмірно менші, ніж звичні для нас найдрібніші предмети. Та все ж вони в сотні тисяч і мільйони раз більші за молекули води або кухонної солі. Такими є молекули рослинної клітковини (з якої складається, наприклад, всім відома вата), каучуку, більшості пластмас.

НАЙМЕНШІ

Молекула — ще не найдрібніша частинка речовини. В деяких випадках вона виявляється навіть дуже великою частинкою. Її ще можна ділити далі: появляться якісь нові, простіші частинки. Проте властивостей молекули, яка їх «породила», вони вже не матимуть.

Понад дві тисячі років тому народилося слово, яке тепер знає кожний школяр,— атом. Виявляється, молекули складаються з найрізноманітнішої кількості атомів.

Що ж таке атом? Який вигляд він має, на що схожий?

На цілий ряд таких питань важко відповісти навіть зараз, коли наука про будову речовини досягла небувалого розвитку.

Строго кажучи, питання про те, який атом «на вигляд», просто немає змісту. Річ у тому, що атом не є чимсь стабільним, а весь час змінюється в обрисах. Окремі частинки, з яких він складається, теж рухаються, раз у раз змінюючи своє взаємне положення.

Атомів різних видів порівняно небагато. Але утворюють вони незчисленну кількість різноманітних молекул. Молекули можуть різнитися не тільки своїм складом, але й розміщенням в них атомів. Буває, що одні і ті ж атоми, розміщаючись по-різному, утворюють різні види молекул. Ось, наприклад, органічні речовини — етиловий спирт і метиловий ефір. Їх атомний склад однаковий. Проте атоми в їх молекулах розміщаються по-різному, тому і властивості цих речовин різні.

Вчені зуміли зважити атоми і молекули. Звичайно, було б нерозумно виражати вагу таких щонайдрібніших частинок у звичайних одиницях — кілограмах, грамах. Навіть мікрограм був би занадто великий для них. Мільярд молекул води, наприклад, важить тільки 30 мільярдних частин мікрограма.

Тому для нових частинок завели нові одиниці вимірювання: їх порівнювали з найлегшим елементом — воднем. Вагу атома водню взяли за одиницю. Тоді атомні і молекулярні ваги стали виражатися порівняно невеликими числами. Пізніше для вимірювання ваги атомів ввели нову одиницю, що дорівнює $\frac{1}{16}$ частині ваги атома кисню.

Отже, в усіх тілах, що нас оточують, в усіх предметах, хоч би якими нерухомими вони здавались, містяться міріади найдрібніших частинок, які безперестану рухаються, змінюючи своє положення. Все це заховане від нас, але як би ми здивувалися, якби могли розглянути те, що робиться в кожній пучці речовини, в кожній дрібничці, яку ми бачимо! Тут кипить робота: молекули і атоми безперервно

рухаються, переміщаються, стикаються і розлітаються в усіх напрямах, щоб через деякий час знову зустрітися і знову розійтись.

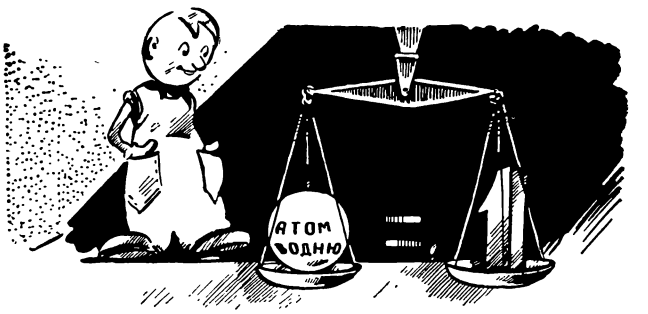
ЗАКОН МЕНДЕЛЄЄВА

Був час, коли здавалося, що властивості різних елементів зовсім довільні, безладні і не підлягають ніяким законам. Вчені намагалися систематизувати різні властивості елементів, але зазнавали невдачі. Геніальний російський вчений Д. І. Менделєєв зумів виявити в їх властивостях прості закономірності, показати, що вони складають стрункy систему.

Виявилося, що треба розмістити елементи відповідно до зростання їх атомної ваги. Тоді вийде таблиця, в якій різні властивості елементів періодично змінюватимуться. Більше того, знаючи властивості одного елементу, можна передбачити властивості іншого (докладніше про це див. статтю «Періодичний закон Д. І. Менделєєва»).

Великий учений був настільки певний у правильності своєї системи, що без всяких вагань заявив: атомні ваги деяких елементів треба виправити. Інакше вони не попадали в ті клітки таблиці, де повинні були б бути, виходячи з їх властивостей. І Менделєєв був правий.

Справжнім його тріумфом було відкриття раніш невідомих, але передбачених ним елементів. Французький вчений Буабодран відкрив галій, швед Л. Нільсон — скандій, а німець К. А. Вінклер — германій. І всі ці елементи виявились у тих самих місцях періодичної системи, куди їх заздалегідь вмістив Менделєєв, а всі їх властивості були точно такими, як передбачив великий учений.



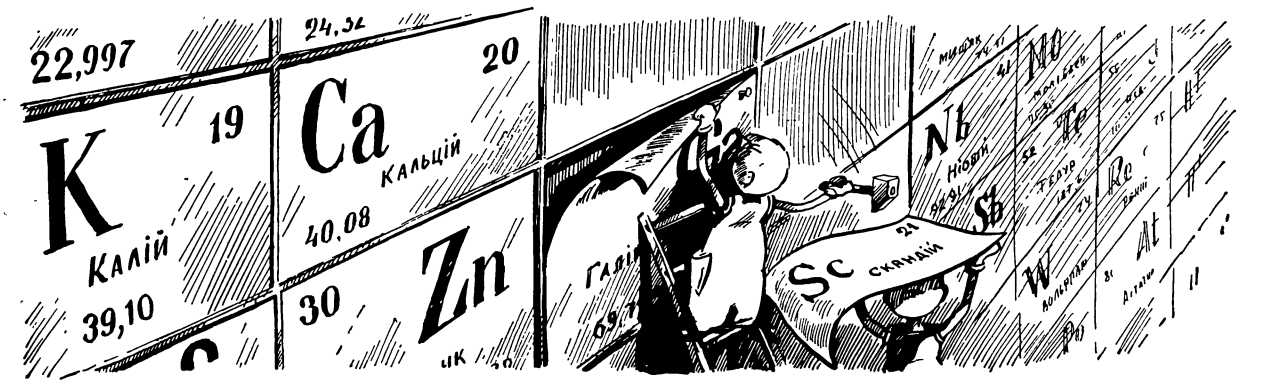
Атомна одиниця.

Так було створено таблицю елементів, дивлячись на яку можна було передбачати властивості різних не відкритих ще елементів і їх сполук. Самі елементи здавались непорушними, сталими. Та ось у кінці XIX ст. зовсім несподівано виявилось, що один елемент поводиться дуже дивно, незрозуміло. Трапилося це так.

ВИПАДКОВЕ ВІДКРИТТЯ

Доля різних відкриттів дуже часто буває найнесподіванішою для сучасників. Французький фізик Анрі Беккерель, по суті справи, відкрив нову галузь фізики, його відкриття дало потужний поштовх розвиткові науки. А тим часом багато вчених зустріло його недовірливо. Правда, це почасти пояснюється тим, що для обгрунтування відкритих явищ доводилось жертвувати багатьма положеннями фізики, у тому числі і такими, з яких на той час склались її основні принципи.

І справді, через десять років після перших робіт Беккереля по стрункій будівлі класичної фізики пішли такі тріщини, що дальші



Елементи, передбачені Менделєєвим.

Відкриття Беккереля.

20 років були затрачені на її полагодження. У чому ж полягало це відкриття?

24 лютого 1896 р. на засіданні Французької Академії наук було зачитано першу доповідь Беккереля про дослідження світіння різних речовин під впливом сонячного проміння. Він цікавився фосфоресценцією — світінням, що появляється після опромінення сонячними променями. Ряд речовин удень ніби нагромаджує сонячну енергію, а вночі виділяє нагромаджене у вигляді слабкого світіння. (Докладніше про це явище можна прочитати в статті «Світло і його застосування»).

Беккерель вважав, що відкриті незадовго перед тим рентгенові промені можуть появлятися саме внаслідок фосфоресценції. Щоб довести це, він загортав фотопластинку в чорний папір і клав на неї досліджувані солі, в яких думав виявити явище, що його цікавило. Потім пластинку проявляли. Якщо на ній виявляли сліди проникаючого випромінювання, то справа ставала ясною: сіль випускала рентгенові промені. Адже чорний папір затримує всі інші промені. Таким чином учений досліджував солі калію і урану. Його досліди спочатку йшли успішно.

Але ось одного разу похмурого дня Беккерель приготував все для досліду з солями урану, але через негоду проводити його не брався. Він заховав фотопластинку і покладену на неї уранову сіль у темну шафу. Як же здивувався Беккерель, коли на проявленій пластинці він помітив виразні сліди випромінювання!

Вони появились без сонця! Але як же це пояснити? Якесь нове випромінювання уранової солі засвічувало пластинку.

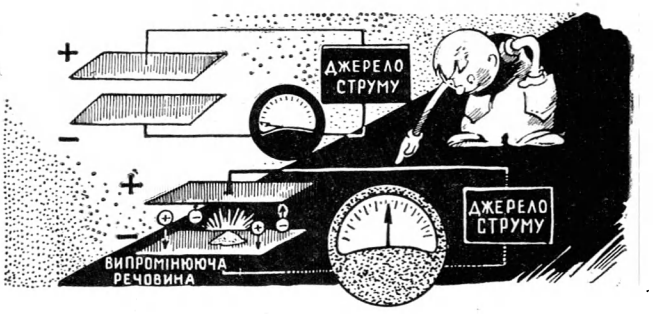
Знову й знову вчений проводив експерименти з різними солями і щоразу переконувався в тому, що випромінювання появляється в усіх випадках, коли препарат містить у собі уран. Нарешті, він випробував металевий порошок чистого урану.

Дослід підтвердив його перші припущення: чистий уран діяв на фотопластинку багато сильніше, ніж будь-яка його сполука. Уран випромінював якісь промені, що проникали крізь непрозорі предмети! Причому джерело цього випромінювання було десь у самому урані, бо він випромінював у яких завгодно умовах.

Отже, Беккерель з'ясував, що з солей урану випромінювались якісь таємничі промені, які засвічували старанно загорнуту фотопластинку. Повітря на їх шляху ставало електропровідним. Під їх впливом світились зеленуватим світлом екрани, вкриті сірчистим цинком і деякими іншими речовинами.

В РОБОТУ ВКЛЮЧАЄТЬСЯ ПОДРУЖЖЯ КЮРІ

Все більше і більше вчених стали повторювати експерименти Анрі Беккереля. Наслідки їх скрізь підтверджувались. Вчені стали досліджувати випромінювання солей урану. Серед цих учених особлива роль належить поль-



Як виявити невидиме випромінювання, відкрите Беккерелем.

ському фізику Марії Кюрі-Склодовській і її чоловікові, відомому французькому вченому професорові П'єру Кюрі. Власне кажучи, не применшуючи значення відкриття Анрі Беккереля, слід сказати, що по-справжньому вивчення радіоактивних речовин почалось тільки після робіт Марії і П'єра Кюрі. Це були справжні сподвижники науки. Вони не мали коштів, щоб запросити собі лаборантів і помічників. Вони не могли навіть найняти підсобних робітників і все, навіть найважчу і найнебезпечнішу роботу, вони робили самі. Виняткова наполегливість і певність у правильності вибраного шляху, розуміння того, що в справжній науці немає «чистої» і «брудної» роботи, вели учених до їх великих відкриттів.

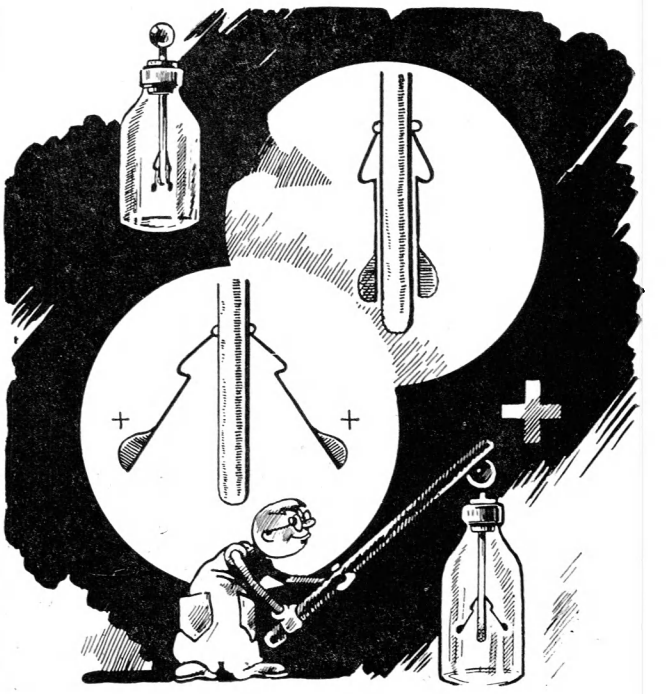
Першою почала роботу Марія Склодовська. П'єр Кюрі, що незадовго перед тим дістав кафедру фізики, досліджував різні магнітні явища. Марія Склодовська вирішила перевірити, чи немає серед речовин, не досліджених Беккерелем, таких, які мають таємничі властивості урану. Завдання було не з легких. Довелось перепробувати безліч речовин.

Шукання провадились з допомогою елементарного приладу — електроскопа. Він дуже наочний, простий у виготовленні і поводженні. Кожний може зробити його сам. Не дивно, що з допомогою цього простого приладу було зроблено дуже багато відкриттів.

На рисунку ми показали найпростіший електроскоп. Це скляна колба, в яку вставлено металевий стержень. Він проходить через пробку-ізолятор. На стержні укріплено дві смужки цигаркового паперу. Якщо його зарядити, листочки розійдуться в різні сторони: адже вони однойменно заряджені. Залежно від величини наданого їм заряду листочки розійдуться більше чи менше. Оскільки повітря — ізолятор, положення їх не повинно змінюватися. Але з часом вони все ж опадають, бо і через повітря стікають заряди.

А якщо на повітря подіяти випромінюванням? Тоді воно стає провідником. Цим і скористалась Марія Склодовська. Вона підносила до зарядженого електроскопа різні мінерали і дивилася, як поводяться його листочки.

Довгий час успіху не було. Марія Склодовська досліджувала все нові й нові речовини. І от у квітні 1898 р. Академія наук почула про нові відкриття. Промені Беккереля випускав ще один важкий метал — торій. Всі його сполуки і мінерали, до складу яких він входив, відзначались цією особливістю.



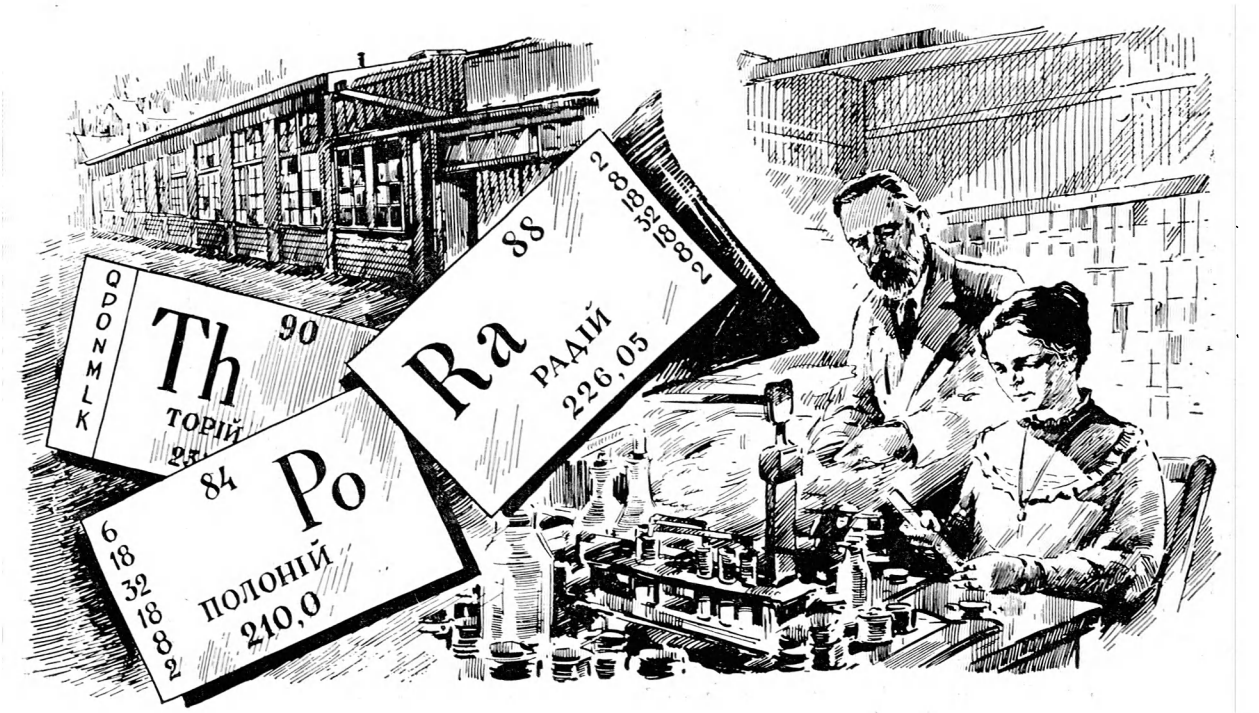
Електроскоп.

НОВІ ЕЛЕМЕНТИ

Уран і торій були відомі як елементи. Але на тому ж самому засіданні Марія Склодовська указала, що два мінерали, які містять у собі уран,— так звана уранова смілка і хальколіт — своєю активністю перевершують чистий уран. Вони швидше примушують опадати листочки електроскопа, швидше і сильніше засвічують фотопластинку. Очевидно, в цих мінералах є якісь сильніші, ніж уран, випромінювачі. Так думала Марія Склодовська.

Але що ж це за речовини? Серед відомих тоді елементів їх не було. І от саме тут і почалась справді титанічна робота.

На щастя для науки, уранову руду після вилучення з неї урану вважали нікому непотрібним відходом. І фірма, що добувала уран, погодилась безплатно передати П'єру і Марії Кюрі кілька тонн цих «відходів». Почалась робота, що нагадувала шукання голки у скирті сіна. Але виявити і виділити нові випромінюючі речовини було, мабуть, важче, ніж знайти в сіні голку. Адже голка не схожа на травинки, тому досить її тільки побачити, і вже всякі сумніви відпадають. А як відрізнити один від одного атоми?



Лабораторія Кюрі.

Кілька місяців підряд день у день, у свята і в неділі, П'єр і Марія Кюрі розчиняли уранову смілку, виділяючи з неї різні речовини. І от, нарешті, вони напали на слід. Появились осади, що дають випромінювання, хоч урану в них завідомо не було.

Тепер перед ученими стояло найголовніше: треба було вияснити, що ж це за речовина, цей новий випромінювач. Для цього в розчин вводили різні сполуки. Відбувалась реакція і появлявся нерозчинний осад, в який випадали сполуки споріднених елементів (що лежать в тій самій групі періодичної системи Менделєєва). Таким способом удається вилучати з розчину шуканий елемент. І от перша перемога: крупинки нового невідомого елементу були в руках наполегливих учених. Цей метал на честь батьківщини Марії Кюрі-Склодовської назвали полонієм.

Але в розчині лишалась активність і тоді, коли з нього було вилучено весь полоній. Ще півроку наполегливої праці — і перед очима вчених кілька крупинок хлористої сполуки нового елементу, потужного випромінювача — радію. З розчину його вилучали за допомогою металу барію.

Обидва ці елементи зайняли свої місця в таблиці елементів Менделєєва. Полоній розмістився поряд з вісмутом, а радій — у другій групі, безпосередньо під барієм. Своїми хімічними властивостями радій був дивно схожий на барій.

Від радію і походить назва — радіоактивні — для випромінюючих речовин, а само явище випромінювання дістало назву радіоактивності.

Радій виявився надзвичайно активним. За даними Кюрі, хлористі сполуки цього металу були в 900 раз активніші за аналогічні сполуки урану.

Так до таблиці Менделєєва були вписані нові елементи, що виявили такі незвичайні властивості. Всі вони попали в самий кінець таблиці, що замикалася ураном. Але ось що особливо вразило вчених. Ще на засіданні Академії наук Беккерель здивовано повідомив, що за 72 години випромінювання уранових солей не змінювалось щодо інтенсивності, хоч він і тримав їх увесь час у цілковитій темряві. Це свідчило про те, що іззовні енергія не надходила і в той же час безперервно витрачалась на випромінювання. Звідки ж вона бралась?

Спостерігаючи за поведінкою радієвих солей, вчені помітили, що пробірка, в якій вони знаходяться, на дотик здається теплішою, ніж навколишні тіла. П'єр Кюрі і французький

вчений А. Лаборд зробили вимірювання і переконались, що це справді так. Радіоактивні речовини виділяли тепло! І, найцікавіше, на відміну від усіх відомих джерел тепла, вони зовсім не змінювались у вазі. 136 *кал* теплоти за годину виділяє 1 *г* радію. Звідкись з надр речовини виділялась енергія, а сама речовина лишалась практично незмінною.

ПРОМЕНІ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ

Тепер уже радіоактивність зацікавила всіх. Сотні вчених в різних лабораторіях світу працювали над проблемами добування і очищення випромінюючих речовин, над вивченням їх властивостей.

У цій галузі одно з перших місць належить англійцеві Ернсту Резерфорду. Цей геніальний вчений і сміливий експериментатор умів передбачати труднощі і переборювати їх, умів пропонувати нові теорії і доводити їх правильність цілою серією несподіваних і блискучих експериментів.

Резерфорд поставив собі за мету не просто відкривати нові випромінюючі речовини. Він хотів з'ясувати, що ж являють собою їх промені. Він правильно припустив, що в цих променях можуть зустрітися заряджені частинки. А вони відхиляються у магнітному полі. Тому Резерфорд пропустив сильний пучок променів радію між полюсами потужного магніту, і його припущення справдились.

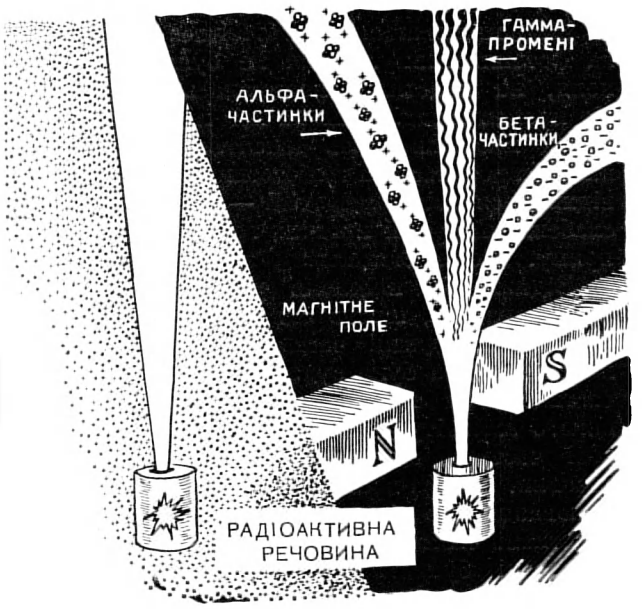
Випромінювання реєструвалося за діянням на фотопластинку. Поки не було магнітного поля, на пластинці появлялась одна пляма від променів радію, що на неї падали. Але ось пучок пройшов крізь магнітне поле. Тепер він ніби розпався на три частини. Один промінь відхилився вліво, а другий — вправо. І тільки слабенький третій промінь не змінив свого напряму. Що ж сталося?

Відхилення променів у магнітному полі ясно показало, що до складу випромінювання входять заряджені частинки; за цим відхиленням можна було судити і про знак заряду частинок. За трьома першими буквами грецького алфавіту і назвав Резерфорд три складові частини випромінювання радіоактивних речовин. Альфа-промені (α) — частина випромінювання, що відхилялася, як відхилялися б позитивні частинки. Негативні частинки були позначені буквою бета (β). А невідхилена частина випромінювання дістала назву гамма-променів (γ). Це, як виявилося, були «частинки» електромагнітного випромінювання, так звані гамма-кванти (про те, що таке квант, див. на стор. 448).

ЯК РОЗПІЗНАЛИ ЧАСТИНКИ

Отже, дослідження Резерфорда, до якого приєднався молодий талановитий фізик Ф. Содді, показали, що речовини у процесі радіоактивного розпаду викидають різні заряджені ча-

Один грам радію виділяє 136 кал тепла за годину. За шість діб його виділиться досить, щоб довести до температури кипіння 200 Г води.



Випромінювання в магнітному полі розпалось на три частини.

стинки. Що це за частинки? Знак їх заряду, як вже ми говорили, визначився за відхиленням у магнітному полі. Але самого тільки знака мало. Вчені хотіли знати точно, які ж це частинки, що вони собою являють. Бета-промені були визначені відразу. Вони виявились потоком дуже швидких електронів. А от з альфа-частинками справа стояла складніше.

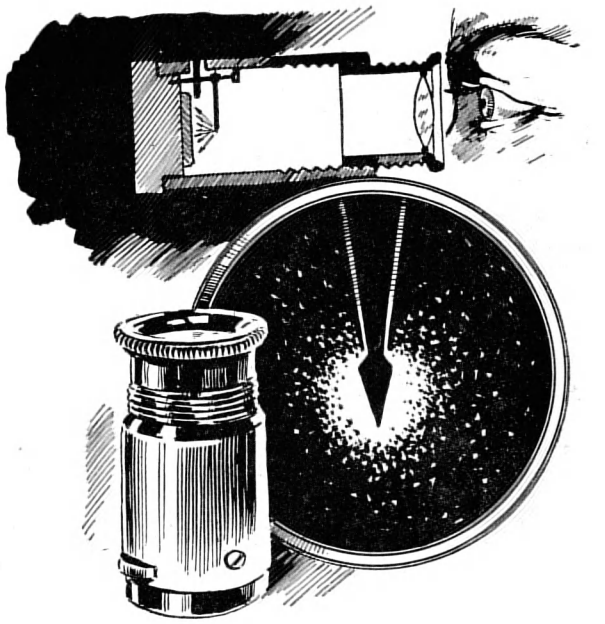
Англійський вчений Дж. Томсон запропонував цікавий метод дослідження заряджених частинок — іонів. Він пропускав пучок іонів крізь два поля — магнітне і електричне. Вони були розміщені перпендикулярно одне до одного. Виявилось, що в даному разі відхилення частинки від початкового прямолінійного напряму залежить від відношення її заряду до маси. Ось цей метод і застосували до альфа-частинок.

Резерфорд і Содді відкрили новий радіоактивний елемент — газ радон. Він виявився тільки альфа-випромінювачем. Цей елемент і послужив для добування альфа-частинок. Пропускаючи їх за методом Томсона крізь поперечні — магнітне і електричне — поля, вчені виміряли відношення їх заряду до маси, яке виявилося в два рази меншим, ніж у іона водню.

Тепер лишалося визначити окремо величину заряду однієї альфа-частинки, після чого нескладний розрахунок дав би дослідникам її масу.

Англійський учений В. Крукс запропонував своєрідний метод реєстрації альфа-частинок. Ми вже говорили про те, що під впливом сонячних променів починають світитися різні речовини. Крукс виявив, що ці речовини можуть світитися і під впливом заряджених частинок. Як тільки частинка потрапляє на екран, вкритий такою речовиною, на ньому негайно ж спалахує яскрава точка. Прилад для вивчення заряджених частинок називається спінтарископом.

Спінтарископом Крукса і виміряли величину заряду однієї альфа-частинки. Для цього його трохи удосконалили: до екрана підключили пристрій, з допомогою якого можна було встановити величину електричного заряду, що зібрався на екрані. Після цього вчені підрахували, скільки частинок потрапило на екран. Тепер уже легко було встановити заряд однієї альфа-частинки. Він виявився у два рази більшим, ніж у електрона. Але тоді маса альфа-частинки повинна була дорівнювати чотирьом, а це маса атома всім відомого газу гелію. Значить, альфа-частинки — це позбавлені двох електронів (двічі іонізовані) атоми гелію. Тут було з чого дивуватися! Виходило, що з деяких радіоактивних речовин безперервно вилітають атоми гелію. А що ж тоді залишається? Як перетворюються атоми радіоактивних речовин?



Спінтарископ Крукса.

ЗАКОНИ РОЗПАДУ

Резерфорд спільно з Содді і ще з одним молодим вченим — Ройдзом почав досліджувати спектри радіоактивних речовин. Один з їх дослідів показав, що в запаяній пробірці, де був радон, поступово появлялась спектральна смуга гелію. А спектральні смуги радону так само поступово слабшали, що свідчило про зникнення цього газу. Але пробірка була запаяна. Куди ж в такому разі міг зникати радон? В іншому досліді крізь тонке віконечко в посудину, позбавлену повітря, впускали альфа-частинки. Спектроскоп показав, що в цій посудині появився гелій, причому його кількість поступово збільшувалась.

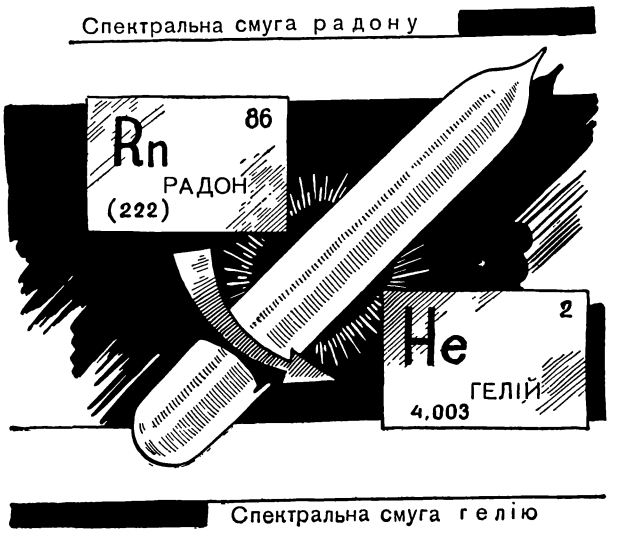
Сумнівів не могло бути. Альфа-частинки виявились двічі іонізованими атомами гелію. А радіоактивні елементи могли з часом перетворюватися в якісь інші елементи.

Вчені відкривали нові радіоактивні елементи, вивчали властивості альфа-, бета- і гамма-променів, а основи всього — закону, за яким відбувалися явища розпаду, все ще не знайшли. Але ось у 1903 р. Резерфорд і Содді запропонували стрункy теорію радіоактивного розпаду, яка пояснила всі відомі науці факти і звела їх у чітку систему.

За цією теорією, атоми радіоактивних речовин істотно відрізняються від атомів звичайних, нерадіоактивних. Ця різниця полягає в тому, що під впливом якихось невідомих причин радіоактивні атоми можуть самодовільно розпадатися, викидаючи або альфа-, або бета-частинки. Гамма-промені супроводять ці процеси.

Вчені вияснили, що в результаті розпаду атоми радіоактивної речовини повинні поступово перетворюватися в атоми якоїсь іншої речовини. Цей новий елемент в свою чергу може бути радіоактивним.

Відношення числа атомів даної речовини, що розпадаються за одиницю часу, до загального числа атомів Резерфорд назвав *сталою розпаду* даного елементу. Грубо кажучи, стала розпаду показує, яка частина атомів радіоактивної речовини може розпастися найближчим часом. Але багато частіше користуються іншою величиною — так званим *періодом напіврозпаду*. Ця величина показує, через який час залишиться рівно половина атомів радіоактивної речовини. Звичайно, період напіврозпаду зв'язаний із сталою розпаду. Чим швидше розпадається речовина, тобто чим більша стала розпаду, тим період менший, і навпаки.



У пробірці з радоном появився гелій.

Дослідження показали, що радіоактивні елементи можуть мати найрізноманітніші періоди напіврозпаду — від десятимільйонних частин секунди до мільярдів років. Але період напіврозпаду для кожної даної речовини цілком певний, і змінити його не може ніщо.

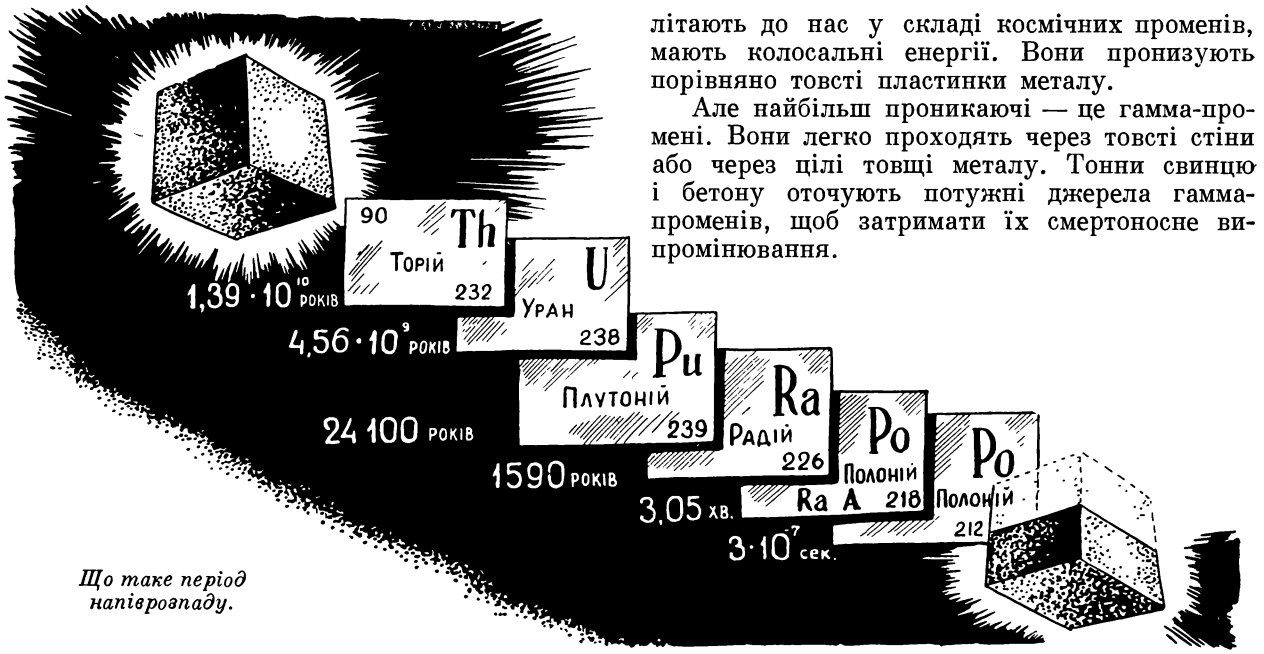
Пробували піддавати радіоактивні елементи колосальним тискам, низьким і високим температурам — однаково точно за певний час розпадалась половина атомів упертого елементу. Це було дивним і чудним — адже вчені звикли, що різні властивості речовини (плавлення, кипіння, розчинність) можна змінювати. А тут, як кажуть, коса наскочила на камінь.

Це безсумнівно свідчило про те, що таємничі перетворення відбуваються десь у самих глибинах речовини.

ТРИ ВИДИ ПРОМЕНІВ

Після відкриття закономірностей радіоактивного розпаду повним ходом пішло вивчення всіх трьох видів випромінювання.

Насамперед їх порівняли за ступенем іонізації повітря і за тим, на яку відстань вони можуть поширюватись. Адже всі випромінювання іонізують повітря, і воно стає провідним. При цьому нейтральні молекули повітря перетворюються в заряджені частинки — іони, а енергія пролітаючої частинки або гамма-кванта зменшується за рахунок роботи, яку вони виконали, іонізувавши молекулу повітря.



Що таке період напіврозпаду.

Шлях альфа-частинки в повітрі невеликий. Затримуються ці частинки дуже легко — невеликого аркуша паперу, не кажучи вже про метал, досить для цього.

Ми не даремно говорили про захист від радіоактивних речовин. Всі види випромінювання здатні руйнувати живі тканини в організмі людини і тварини. На них діє і альфа-, і бета-, і гамма-випромінювання. Першою людиною, що потерпіла від радіоактивних речовин, був сам Анрі Беккерель. Якось він поклав у кишеню жилетки трубочку з радіоактивним препаратом, проносив її в кишені порівняно недовго, але і цього часу було цілком досить, щоб у нього утворилася невигойна виразка. Великі опіки були і на руках у Марії Кюрі-Склодовської — на руках, через які пройшло стільки радію і полонію!

Від альфа-частинок уберегтися порівняно неважко. Учений, що працює з відкритими альфа-препаратами, може захистити свої руки звичайними гумовими рукавичками. Більш проникаючим є бета-випромінювання. Електрони, що їх дають атоми радіоактивних речовин, розлітаються в усіх напрямах з швидкістю, що наближається до швидкості світла,—300 тис. *км/сек*! Енергії цих частинок, навіть випромінюваних одною якоюсь радіоактивною речовиною, дуже різні. Але увібрати їх важче, ніж альфа-частинки. Для цього гумових рукавичок уже не досить. Найенергійніші бета-частинки, що долітають до нас у складі космічних променів, мають колосальні енергії. Вони пронизують порівняно товсті пластинки металу.

Але найбільш проникаючі — це гамма-промені. Вони легко проходять через товсті стіни або через цілі товщі металу. Тонни свинцю і бетону оточують потужні джерела гамма-променів, щоб затримати їх смертоносне випромінювання.

РОЗПАДНІ РЯДИ

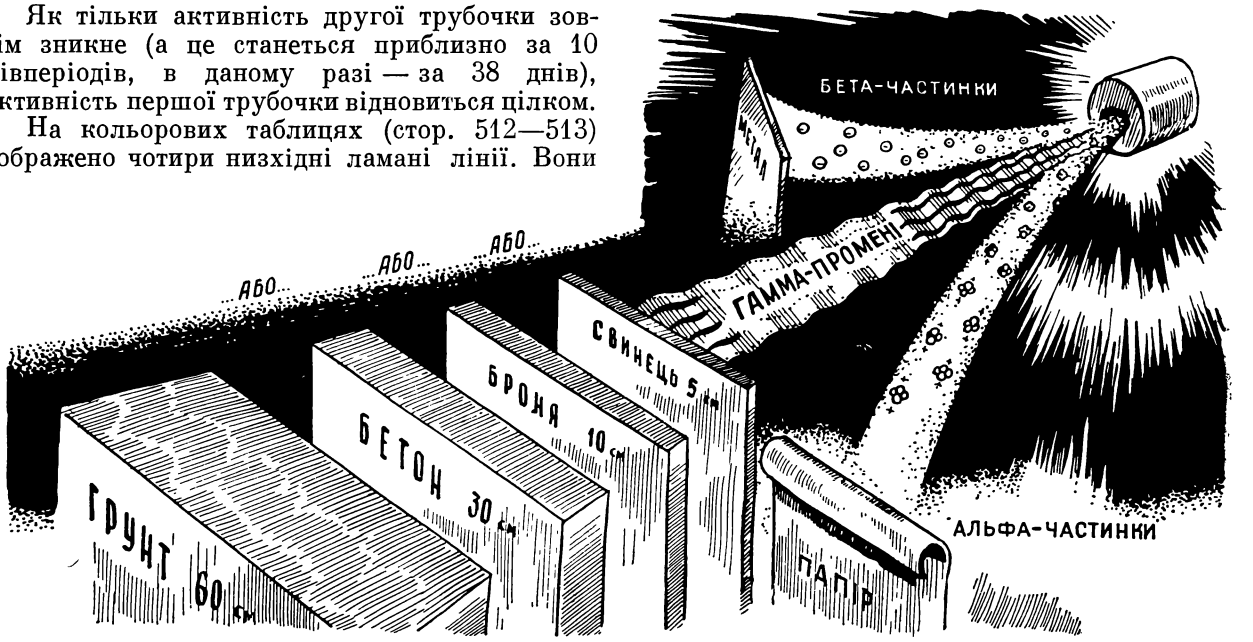
При радіоактивному розпаді одні елементи утворюються з інших і в свою чергу розпадаються самі. Утворюється своєрідний ланцюжок, в якому послідовно стоять різні елементи, що переходять таким шляхом один в одного.

Більше того, якщо є в наявності один з них, то обов'язково є або незабаром появляються і інші члени численного ряду. Тому навіть найбільш недовговічні елементи існують, поки не зникне їх прародитель.

Учені проробили дуже цікавий експеримент. З запаяної трубочки, в якій довгий час був кусочок радію, викачали повітря разом з радоном, що в ньому містився. Природно, активність кусочка радію зменшилась. Але зате появилось нове радіоактивне джерело — трубочка, в яку перекачали радон. А потім активність цієї другої трубочки почала зменшуватись: радон — дуже недовговічний елемент, період його напіврозпаду 3,81 дня. Розпадаючись, він перетворюється в так званий радій-А. Проте в першій трубочці активність таким самим темпом почала наростати. В ній з радію, який там був, почав утворюватися новий радон. Період напіврозпаду такого потужного випромінювача, як радій, досить великий — 1590 років. Ось чому П'єр Кюрі не помітив зменшення кількості тепла, що його виділяє радій.

Як тільки активність другої трубочки зовсім зникне (а це станеться приблизно за 10 півперіодів, в даному разі — за 38 днів), активність першої трубочки відновиться цілком.

На кольорових таблицях (стор. 512—513) зображено чотири низхідні ламані лінії. Вони



Як затримати випромінювання.

зображають чотири радіоактивні ряди, якими ми їх знаємо сьогодні. Перший, найголовніший і відомий, має назву ряду урану — радію. Уран, радій, радон, полоній — члени цього численного ряду. Тому в складі випромінювання урану або радію так багато різних частинок. Це — сумарне випромінювання всіх членів такого радіоактивного ряду. На таблиці ви бачите, як через вигадливий ланцюжок альфа- і бета-розпадів ми тут доходимо від урану до стабільного свинцю.

Два інших ряди — ряди торію і актинію. Можна сказати, що вони схожі на ряд урану.

Четвертий радіоактивний ряд відкрили зовсім недавно. Він містить у собі не тільки вже відомі радіоактивні елементи, але й два нових — астатин і францій, яких ніяк не могли досі знайти. Коли їх добули штучно, стало ясно, чому це відкриття не зробили раніше. Справа в тому, що францій має період напіврозпаду всього 5 хв., а астатин і того менше — 0,01 сек.

Ви, мабуть, звернули увагу на те, що цілий ряд елементів, які входять до складу цих рядів, має один і той самий порядковий (атомний) номер за таблицею Менделєєва, але різні атомні ваги. Такі атоми називаються ізотопами. Ми розкажемо далі про причини їх появи і про те, чим пояснюється відмінність в їх атомних вагах і схожість у поведінці і властивостях. (Про застосування радіоактивних ізотопів див. статтю «Мічені атоми» в т. 5 ДЕ).

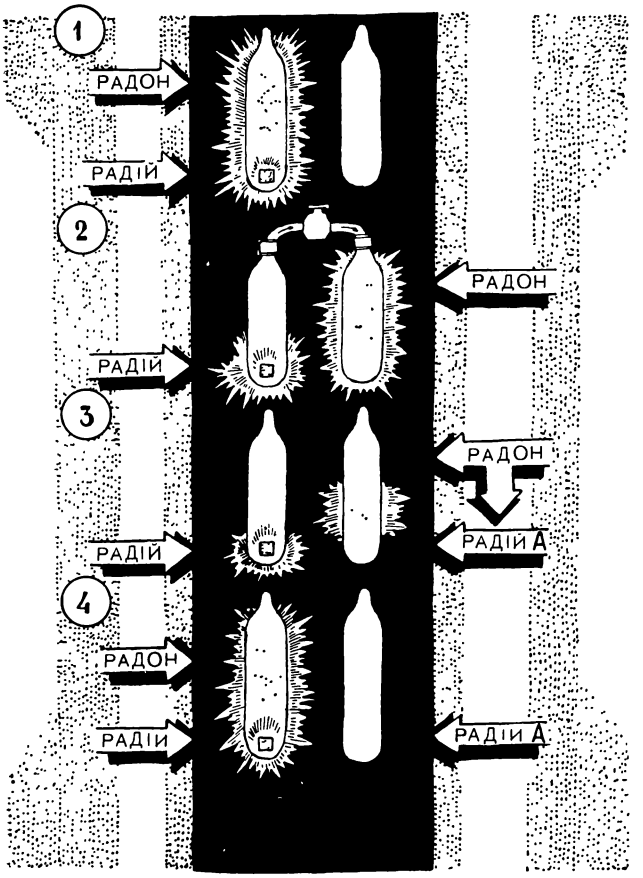
Отже, радіоактивні речовини розпадаються, переходячи одна в одну. Причини цього явища можна було б визначити, тільки проникнувши в глиб атома. Адже розпад якраз і показав, що атом — подільна частинка. Треба було проникнути в самі надра природи!

ВСЕРЕДИНУ АТОМА

Ми розповімо тепер про один з найбільш хвилюючих експериментів, проведених на початку XX ст.

У 1903 р., коли всім ученим стало ясно, що неподільності атома прийшов край, появилась перша модель атома.

Англійський учений Дж. Томсон запропонував модель атома, згідно з якою атом являє собою кульку, рівномірно заповнену позитивним зарядом, а всередині кульки розміщені електрони. Їх можна вирвати з неї, тоді атом стає іоном. Число цих електронів цілком компенсує сумарний позитивний заряд атома. Коливання електронів відбуваються з певними для даного атома, вірніше для даного сорту



Народження радону.

атомів, частотами. А певна частота — це певний колір, що відповідає лінії в спектрі елементу.

З цього боку все ніби було гладко, але радіоактивність Томсон остерігався пояснювати. Як розподілена маса по кульці-атому, теж лишалось невідомим.

Для того щоб перевірити правильність цієї теорії, треба було якось заглянути в глиб атома. Апаратура тих часів була груба, і поставити такий дослід не можна було. Вихід знайшов Ернест Резерфорд, який використав найдрібніші снаряди з усіх, що будь-коли застосовувалися людиною,— альфа-частинки радіоактивних елементів. Учений обстрілював цими частинками атоми різних елементів, щоб таким способом вияснити їх будову.

Так Резерфорд почав свої класичні досліди по обстрілу альфа-частинками атомів металів. І тут почались несподіванки.

Насамперед про саму постановку досліду. У ядерній фізиці, як, мабуть, ніде, результати залежать від правильної постановки і проведення дослідів. Недаром учені у своїх звітах стільки часу приділяють щонайдосконалішому описові апаратури і методики проведення самого експерименту.

Досліди Резерфорда були поставлені надзвичайно просто. На шляху альфа-частинок ставили тонку металеву фольгу такої товщини, щоб завідомо не затримувати їх. Але в той же час частинки на своєму шляху повинні були проходити через атоми металу і якось взаємодіяти з ними. Після фольги кожна частинка потрапляла на екран з сірчистого цинку, де давала спалах.

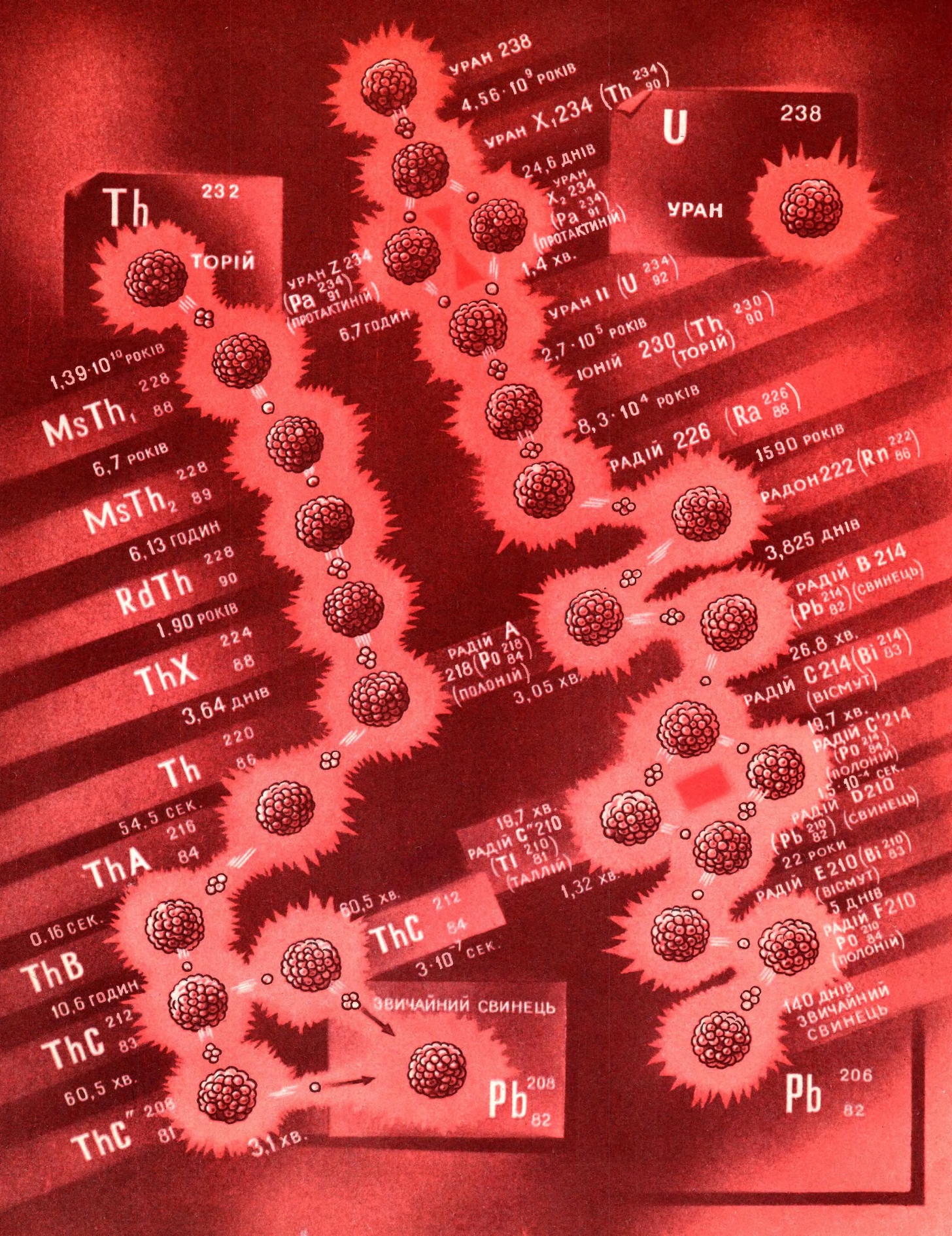
Учений сподівався, що, пройшовши через металеву фольгу, яка містить у собі величезну кількість атомів, альфа-частинки дуже відхиляться від початкового шляху, полетять у всіх напрямах... Та де там! Тільки одна частинка з 8 тисяч відхилялась на значний кут. Усі інші проходили, майже не відхилившись від початкового напряму.

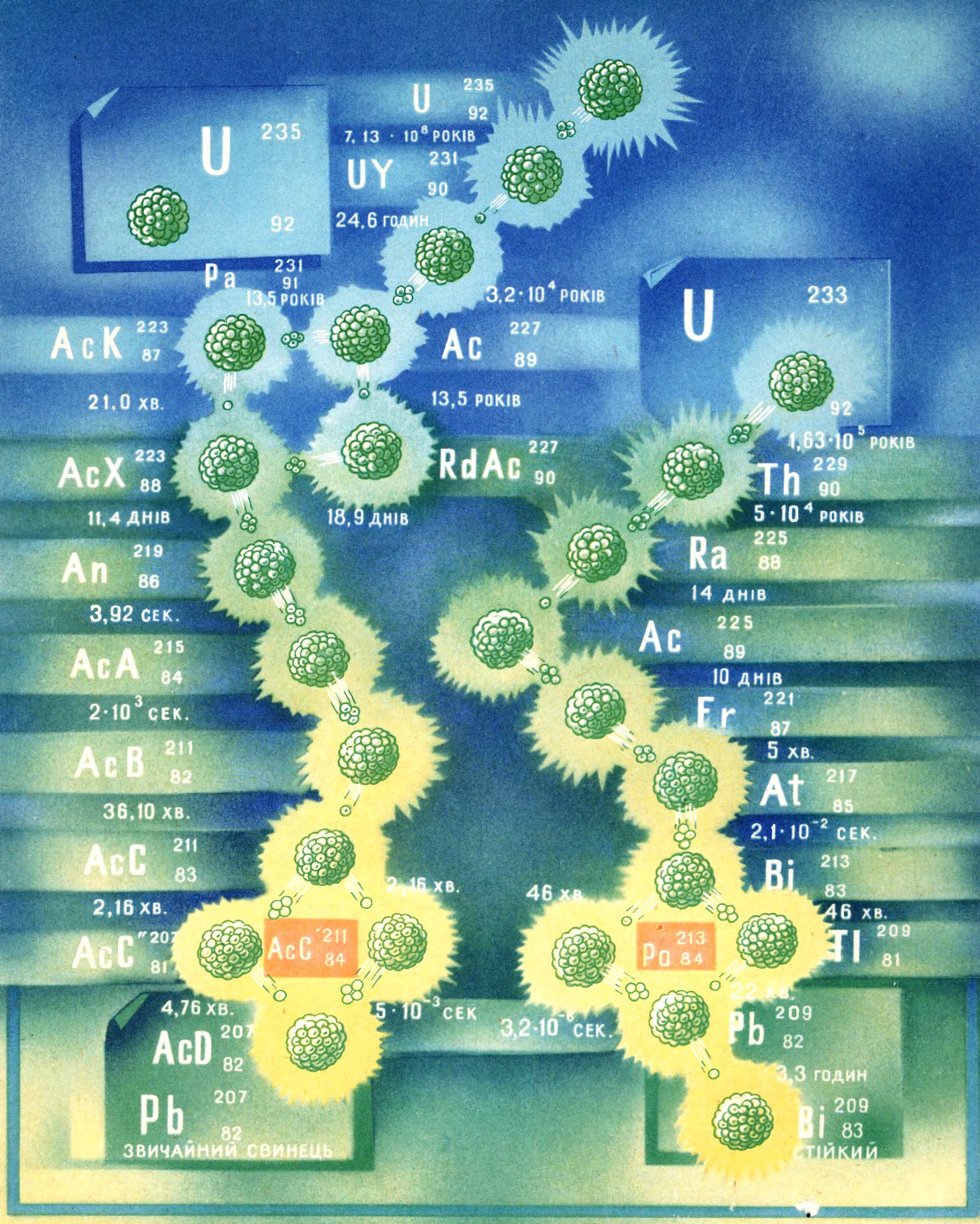
Учні Резерфорда — Гейгер і Мардсен — проробили велику кількість дослідів, але всі вони давали в середньому одне і те ж саме. Альфа-частинки не стикалися на своєму шляху з атомами металів, а проходили через них вільно. Та зате, коли це зіткнення відбувалося, результати його були такими, ніби на шляху частинок зустрілась непереборна перешкода. Цю перешкоду не могли створити негативні електрони. Адже альфа-частинка відкидалась назад, а ще Кулон показав, що це може зробити тільки заряд однойменний з її зарядом, в даному разі позитивний заряд якоїсь частини атома.

Виходячи з великих кутів відхилень альфа-частинок і з того, що їх зіткнення з атомом відбувалося рідко, Резерфорд зробив висновок, що всередині, в самій глибині атома є позитивний заряд, зв'язаний з масою атома. Він назвав цю частину атома ядром.

Резерфорд і його учні проробили багато дослідів, у яких альфа-частинки відхилялись від свого шляху в різних металевих фольгах,

Таблиця 29. Ліворуч — ряд радіоактивних елементів торію, праворуч — ряд радіоактивних елементів урану-238.


Th 232
ТОРІЙ
U 238
УРАН
УРАН 238
4,56·10⁹ РОКІВ
УРАН X₁ 234 (Th 234 90)
24,6 ДНІВ
УРАН X₂ 234 (Pa 234 91) (ПРОТАКТИНІЙ)
1,4 ХВ.
УРАН Z 234 (Pa 234 91) (ПРОТАКТИНІЙ)
6,7 ГОДИН
УРАН II (U 234 92)
2,7·10⁵ РОКІВ
ЮНІЙ 230 (Th 230 90) (ТОРІЙ)
8,3·10⁴ РОКІВ
РАДІЙ 226 (Ra 226 88)
1590 РОКІВ
РАДОН 222 (Rn 222 86)
3,825 ДНІВ
РАДІЙ A 218 (Po 218 84) (ПОЛОНІЙ)
3,05 ХВ.
РАДІЙ B 214 (Pb 214 82) (СВИНЕЦЬ)
26,8 ХВ.
РАДІЙ C 214 (Bi 214 83) (ВІСМУТ)
19,7 ХВ.
РАДІЙ C' 214 (Po 214 84) (ПОЛОНІЙ)
1,5·10⁻⁴ СЕК.
РАДІЙ D 210 (Pb 210 82) (СВИНЕЦЬ)
22 РОКИ
РАДІЙ E 210 (Bi 210 83) (ВІСМУТ)
5 ДНІВ
РАДІЙ F 210 Po 210 84 (ПОЛОНІЙ)
140 ДНІВ
ЗВИЧАЙНИЙ СВИНЕЦЬ
Pb 206 82
1,39·10¹⁰ РОКІВ
MsTh₁ 228 88
6,7 РОКІВ
MsTh₂ 228 89
6,13 ГОДИН
RdTh 228 90
1,90 РОКІВ
ThX 224 88
3,64 ДНІВ
Th 220 86
54,5 СЕК.
ThA 216 84
0,16 СЕК.
ThB
10,6 ГОДИН
ThC 212 83
60,5 ХВ.
ThC'' 208 81
3,1 ХВ.
60,5 ХВ.
ThC 212 84
3·10⁻⁷ СЕК.
19,7 ХВ.
РАДІЙ C'' 210 (Tl 210 81) (ТАЛІЙ)
1,32 ХВ.
ЗВИЧАЙНИЙ СВИНЕЦЬ
Pb 208 82


U 235 92
7,13 · 10⁶ років
UY 231 90
24,6 годин
Pa 231 91
13,5 років
3,2·10⁴ років
AcK 223 87
21,0 хв.
Ac 227 89
13,5 років
U 233 92
1,63·10⁵ років
AcX 223 88
11,4 днів
RdAc 227 90
18,9 днів
Th 229 90
5·10⁴ років
An 219 86
3,92 сек.
Ra 225 88
14 днів
AcA 215 84
2·10⁻³ сек.
Ac 225 89
10 днів
Fr 221 87
5 хв.
AcB 211 82
36,10 хв.
At 217 85
2,1·10⁻² сек.
AcC 211 83
2,16 хв.
Bi 213 83
46 хв.
AcC" 207 81
4,76 хв.
AcC 211 84
2,16 хв.
Po 213 84
46 хв.
Tl 209 81
22 хв.
5·10⁻³ сек
3,2·10⁻⁶ сек.
AcD 207 82
Pb 207 82
звичайний свинець
Pb 209 82
3,3 годин
Bi 209 83
стійкий

або, як кажуть вчені, розсіювались атомами металу. Резерфорд навіть розрахував, на який кут, залежно від маси відповідного ядра атома, вони мають розсіятися.

На основі відхилення альфа-частинок від прямого шляху обчислювали заряд відхиляючих ядер. Але, коли частинка пролітала дуже близько від гаданого ядра атома, відхилення її було не таким, яким воно повинно було б бути, виходячи з формули Резерфорда.

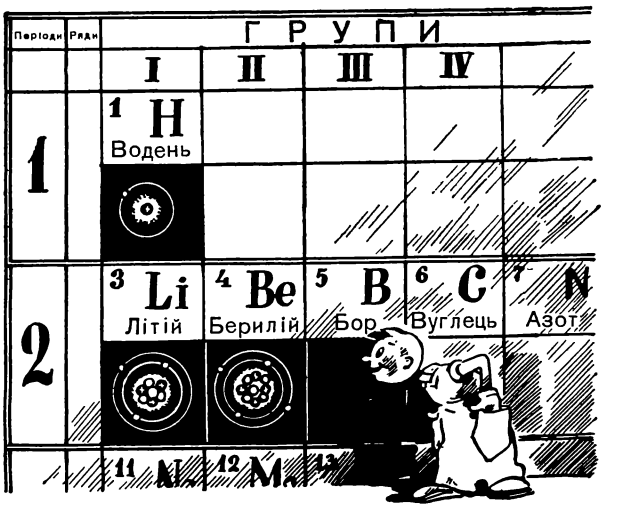
З цієї незбіжності вчений зробив цікавий висновок. При виведенні своєї формули він вважав ядро точкою, тобто частинкою, що не має розмірів. Поки альфа-частинка проходила далеко від ядра, з цим наближено можна було погодитися. Але поблизу ядра це було вже неправильно. Звідси Резерфорд і обчислив розміри ядра. Виявилось, що його поперечник повинен бути в 100 тис. раз менший, ніж поперечник усього атома. А якщо врахувати, що розміри самого атома з звичайної точки зору вже зникаюче малі (адже поперечник його в стільки разів менший, ніж поперечник горошини, у скільки разів сама ця горошина в поперечнику менша за відстань від Москви до Калініна), то стане ясно, яким малятком повинно бути атомне ядро.

За своєю формулою Резерфорд визначив заряди різних ядер. Цю роботу продовжив один з його найбільш талановитих співробітників Дж. Чедвік. За допомогою надзвичайно точної установки він виміряв заряди ядер різних металів — золота, срібла, платини і міді.

А коли вчені підрахували ці величини, то виявилося, що вони точно дорівнюють порядковому номерові відповідного металу в періодичній системі елементів Менделєєва. Таким чином, стало ясно, що «неподільний» атом насправді — складне утворення, в центрі якого знаходиться позитивно заряджене ядро з зарядом, що дорівнює порядковому номерові елементу в періодичній системі. А електрони, мабуть, оточують позитивне ядро подібно до планет, що обертаються навколо Сонця. Так виникла планетарна модель атома.

ПОЯСНЕННЯ НІЛЬСА БОРА

Встановлене Резерфордом уявлення про атом відразу просунуло вперед розуміння його природи, тепер можна було пояснити багато особливостей, зв'язаних з найдрібнішими «цеглинками» світобудови.



Атом у системі елементів Менделєєва.

Проте і ця модель, як звичайно буває в науці, висвітливши ряд явищ, не змогла пояснити такий важливий факт, як добре відома стійкість атома. Справді, уже тоді було добре відомо, що електричний заряд, електрон, не може довго обертатися навколо ядра. Такий рух заряду збуджує електромагнітні хвилі, які в разі руху електрона в атомі сприймалися б як ультрафіолетове світло. Однак випромінювання світла зв'язане з витрачанням енергії рухомого електрона. В результаті через малий час електрон повинен був би впасти на ядро і зупинитися. Проте нічого подібного не спостерігається.

Багато було зроблено спроб пояснити стійкість атома на основі добре відомих з практики фізичних законів, проте жодна з них не завершилась успіхом. І тільки в 1913 р. датчанинові Нільсу Бору вдалось розв'язати це завдання. Але для цього йому довелось відмовитися від звичайних, як кажуть, «класичних», уявлень про характер явищ всередині атома — уявлень, заснованих на дослідах з тілами, незмірно більшими, ніж атом. Виявилось, що атом тільки зовні нагадує планетну систему. Але разом із зменшенням розмірів міняються і основні закони, що ним керують, і не можна механічно застосовувати до такого малого об'єкта закони, встановлені для великих тіл.

Таблиця 30. Ліворуч — ряд радіоактивних елементів урану-235, праворуч — ряд радіоактивних елементів урану-233.

Уперше на такі нові фізичні закономірності звернув увагу німецький фізик Планк. Він установив на основі експерименту закон теплового випромінювання нагрітого тіла. При цьому він звернув увагу на те, що випромінювання має переривний характер. Планк зміг обгрунтувати свій закон тільки за допомогою чудового припущення, що енергія коливання атомів не довільна, а може набирати тільки ряду цілком певних значень. Пізніші дослідження цілком підтвердили це припущення. Виявилось, що переривність властива кожному випромінюванню, що світло складається з окремих порцій — к в а н т і в — енергії (див. стор. 448).

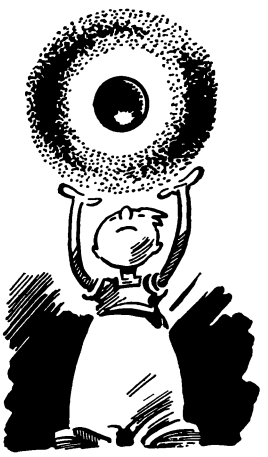
Планк установив, що світло з частотою коливання повинно випромінюватися і вбиратися порціями, причому енергія кожної такої порції, енергія кванта, зв'язана з частотою співвідношенням

$$E = h\nu.$$

Стала величина h називається тепер с т а л о ю П л а н к а. Вона дорівнює $(6{,}62377 \pm \pm 0{,}00018) \cdot 10^{-27}$ *ерг · сек.*

Бор застосував ідею про переривність випромінювання енергії до атомних явищ, припустивши, що атом може як завгодно довго перебувати в певних, стійких станах, не випромінюючи енергії. Кожний такий стан зв'язаний з певним характером руху електрона — з його орбітою.

На такій стійкій орбіті електрон має сталу енергію, яка не змінюється з часом. Енергія його змінюється, тільки коли він «перескакує» з одної орбіти на іншу. При цьому випромінюється квант енергії, що дорівнює різниці енергії на початковій і кінцевій орбітах електрона. Частота випромінюваного світла визначається, із співвідношення Планка, за енергією кванта. Через те що атом кожного хімічного елементу має свої, характерні для нього орбіти електронів, то світло, випромінюване цим атомом, матиме частоти, властиві тільки цьому атомові.



Модель атома водню.

Таким чином, знаючи частоти світла, випущеного атомом,— його спектр, можна дізнатися, який атом випустив це світло. На цьому базується ціла галузь науки — спектральний хімічний аналіз.

Теорія Бора дала можливість пояснити велику кількість експериментальних фактів, які були абсолютно незрозумілі з точки зору старої, «класичної» фізики.

ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ

Перша світова війна відірвала вчених від дослідження атомного ядра, бо таке дослідження здавалось тоді позбавленим будь-якого практичного значення. Повернулись до нього тільки в 1919 р., коли все той самий Ернест Резерфорд своїми експериментами знову привернув увагу всього світу до лабораторії, де вивчають найбільш незрозумілі явища.

Тут людина вперше досягла перетворення елементів. Адже досі людина вміла тільки добувати різні сполуки елементів або розкладати їх на складові частини. Та й то деякі з елементів, як, наприклад, інертні гази (гелій, неон, аргон, криптон і ксенон), ніяк не піддавались впливу і не вступали в сполуки. Та самі елементи лишались непорушними, хоч би як їх випробовували.

Мрії середньовічних алхіміків давно вже були висміяні. Вважалось доведеним, що тільки люди, які нічого не розуміють в науці, можуть думати про можливість добування золота з інших елементів.

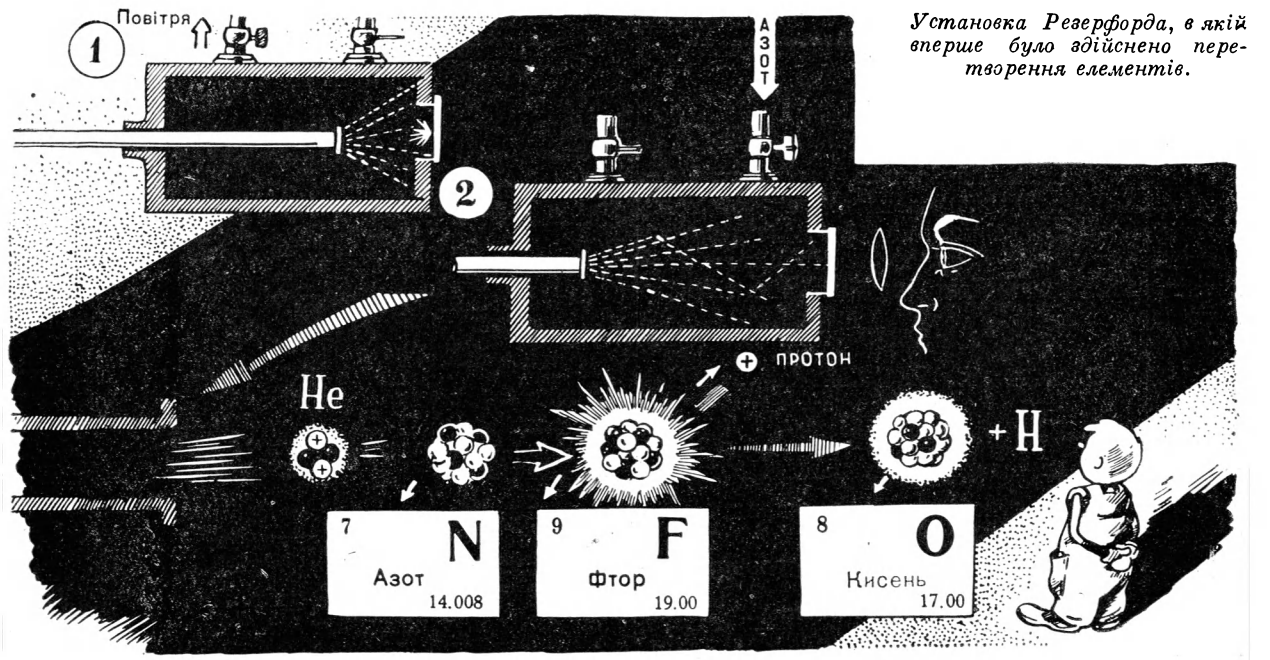
І раптом знайшлась така людина, яка не тільки припустила можливість таких перетворень, але й довела цю можливість найбільш наочним способом.

Звичайно, не слід думати, що Резерфорд у затишку лабораторії справді добув кусок золота з свинцю або з іншого металу, а потім урочисто показав його враженим глядачам.

Ні! Побачити добуті елементи було нелегко, для цього треба було користуватися складним обладнанням. Але важливий був самий факт активного втручання людини в досі недоступну їй сферу — внутрішньоатомний простір.

Резерфорд тепер спробував не тільки вивчити будову ядра. Його тепер цікавило зовсім інше. Він хотів «вдертися» в цей світ і спробувати відірвати від ядра одну або кілька складових його частин — переробити ядро атома.

І це завершилось тріумфом науки!



Установка Резерфорда, в якій вперше було здійснено перетворення елементів.

Користуючись найелементарнішими пристроями, учений почав дослідження взаємодії альфа-частинок з ядрами.

Сучасним ученим, що мають прекрасно обладнані лабораторії, часом просто важко собі уявити, за допомогою якого примітивного обладнання ставив Резерфорд свої чудові досліди. Великий фізик завжди підкреслював, яке важливе для вченого вміння правильно провести експеримент. І прекрасні результати його дослідів багато в чому пояснюються вмінням старанно підготувати експеримент, умінням створити потрібну апаратуру.

Установка Резерфорда складалася з джерела альфа-частинок (осадок радію-В на металевій пластинці) і реєстратора цих частинок — флуоресціюючого екрана. З його допомогою можна було відрізняти різні частинки одну від одної: залежно від величини їх заряду і енергії яскравість спалаху на екрані змінювалась.

Усю цю установку було вміщено в посудину з чистим повітрям.

Поки тиск газу в посудині був невеликий, екран весело спалахував голубими точками: альфа-частинки бомбардували його поверхню. Але ось тиск газу збільшився, пробіг альфа-частинок зменшився, і спалахи зникли: частинки не долітали до екрана. Яскравих спалахів не було.

Та зате іноді на екрані стали появлятися бліді спалахи. Їх було небагато, але вони настійливо спалахували то там, то тут. Вони були точнісінько такими самими, як спалахи від падіння на екран ядер водню — протонів.

Результат був разючий. «Звідки взялись протони?» — дивувалися вчені. Їх здивування було цілком зрозумілим: перед ними було нове явище. Адже протонів завідомо не могло бути всередині трубки, в якій відбувався дослід. Значить, в результаті взаємодії ядер гелію і ядер атомів якогось газу, що входить до складу повітря, появились протони. Досліди Резерфорда були повторені в десятках лабораторій.

З допомогою дуже тонкої методики вчені довели, що в повітрі справді відбувається ядерна реакція. Беруть участь у ній ядра азоту.

У спеціальному пристрої — камері Вільсона — одержали знімки, на яких було ясно видно, як альфа-частинка загальмовується і від цього місця розходяться сліди двох частинок — протона і ядра, що утворилися в результаті реакції.

Який же елемент утворюється в результаті цієї взаємодії? Атомна вага азоту — 14, а гелію — 4. Сумарний заряд їх ядер — 9. Вилітає протон, що має одиничні масу і заряд. Значить, лишається 8 одиниць заряду і 17 одиниць маси. Коротше кажучи, появиться

різновидність (ізотоп) кисню з атомною вагою 17. Цю реакцію можна записати так:

$$N^{14}_{7} + He^{4}_{2} \rightarrow O^{17}_{8} + H^{1}_{1}.$$

Ми й надалі так само записуватимемо різні ядерні реакції, які нам треба буде розглянути. Біля хімічного символу відповідного елементу справа внизу записано номер елементу, що визначається зарядом ядра, а справа вгорі — масове число, що відповідає атомній вазі даного ізотопу.

УДАР ПО ЯДРАХ АТОМІВ

Відкриття Резерфорда окрилило фізиків. У багатьох лабораторіях почалась серія дослідів з бомбардуванням ядер зарядженими частинками. Успіх дослідів у дуже великій мірі залежав від енергії бомбардуючих частинок. Але як її збільшити?

Поки користувалися природними джерелами, нічого не можна було додати до швидкості частинок. Кожний радіоактивний елемент давав частинки певної енергії, притому не дуже-то великої. І почали шукати способи прискорення частинок. Всім стало ясно, що перетворення ядер — майбутнє науки. Таким же ясним було і інше: поки дослідники не навчаться прискорювати частинки, вони не доб'ються серйозних успіхів.

Уже в 1932 р. англійським ученим Д. Д. Коккрофту і Е. Уолтону вдалось добути ядра водню — протони великої на той час енергії. З допомогою цих прискорених протонів Коккрофт і Уолтон зробили ще одне важливе для фізики відкриття.

Коли бомбардували прискореними протонами ядра літію, спостерігалось випускання двох альфа-частинок. Цю реакцію можна записати так:

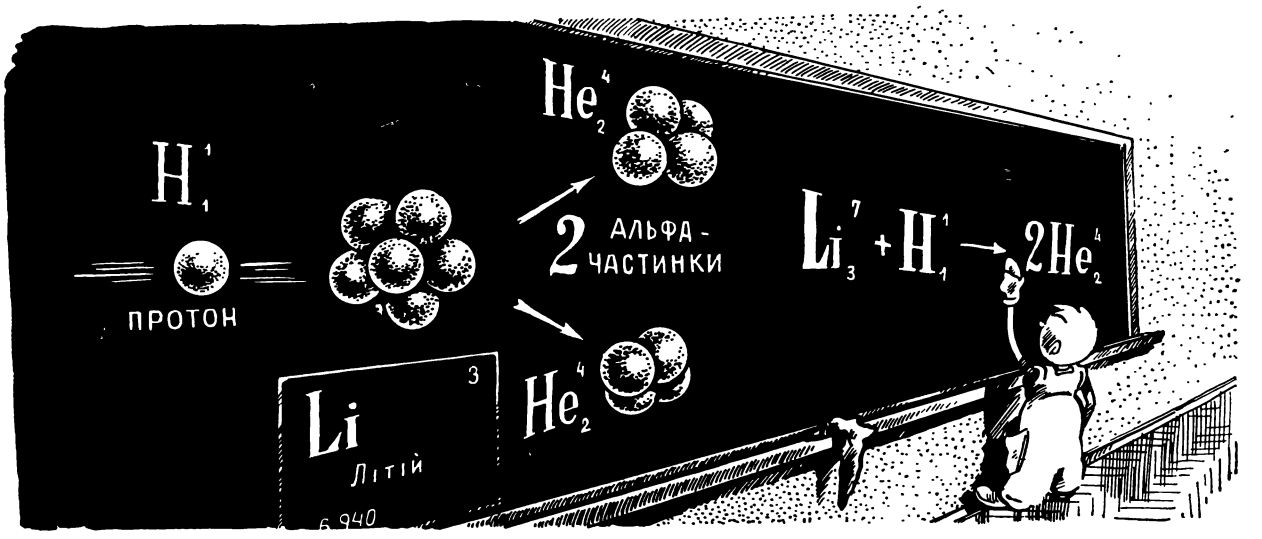
$$Li^{7}_{3} + H^{1}_{1} \rightarrow 2He^{4}_{2}.$$

Здавалось би, нічого дивного тут немає. Але, мабуть, дізнавшись про цю реакцію, людство вперше серйозно подумало про можливість використання колосальної внутрішньоядерної енергії. Справа в тому, що в результаті цієї реакції виділялась велика кількість енергії.

Але навіщо прискорювати частинки, навіщо збільшувати їх енергію? Хіба без цього не можуть відбуватися різні ядерні реакції?

Відбуватися вони, звичайно, можуть. Але справа ось у чому. Летить заряджена частинка до атома, до його ядра. Припустимо, «націлились» ми дуже добре, «снаряд» послано точно в ціль. Але як тільки підлетить він до неї ближче, зразу ж звертає вбік, огинає ядро, ніби ядро спеціально відводить убік усі снаряди, що їх посилають учені, не хоче реагувати з різними частинками.

Ядро атома має потужний захисний бар'єр — заряд ядра. Саме так! Адже ядро має позитивний заряд, той самий, який мали ядерні снаряди, що в той час були в розпорядженні



Прискорені протони народжують дві альфа-частинки.

вчених (електрони тоді не використовувались в «атомній артилерії» — попадання електрона в ядро не може викликати його розпад).

І от, як тільки підлетить така позитивно заряджена частинка до ядра, зразу ж проявляються потужні сили відштовхування. Чим ближче підходять одна до одної частинки, тим більші сили відштовхування. Чим більша енергія частинки, тим ближче зможе вона «пробитися» до ядра атома. А на дуже близьких відстанях, біля самого ядра, відбувається щось дивне. Те ж саме ядро, яке щойно так противилось наближенню частинки, враз стає гостинним господарем! На дуже близьких відстанях починають діяти ядерні сили. Саме вони й втягують частинку в ядро.

Потужний захисний бар'єр атомного ядра — його заряд.

Значить, треба розігнати частинку до такої швидкості, щоб заряд ядра не зміг відкинути її вбік, поки вона не наблизиться до ядра впритул. А там уже ядерні сили втягнуть частинку всередину.

НЕЗВИЧАЙНІ ЧАСТИНКИ

Поки розвивалась «ядерна артилерія», поки вдосконалювались прискорювачі, вчені, звичайно, марно не гаяли часу. Вони вивчали взаємодію частинок і ядер, користуючись уже відомими методами.

Проте напочатку типи «ядерних снарядів» були дуже обмежені. Практично використовували тільки альфа-частинки. Адже перші прискорювачі появились тільки в 1932 р., а джерела альфа-частинок давно були під рукою.

І, по суті справи, вивчалась одна єдина ядерна реакція — ядро вбирало альфа-частинку і випускало протон. А енергії всіх інших частинок просто не вистачало для того, щоб почалась якась ядерна реакція. У першу чергу обстрілювались усі легкі елементи. Це і зрозуміло: у них заряд ядра менший, значить, і сили відштовхування менші, значить, альфа-частинка зможе швидше розбити таке легке ядро. І всі легкі елементи при такому бомбардуванні випускали протони.

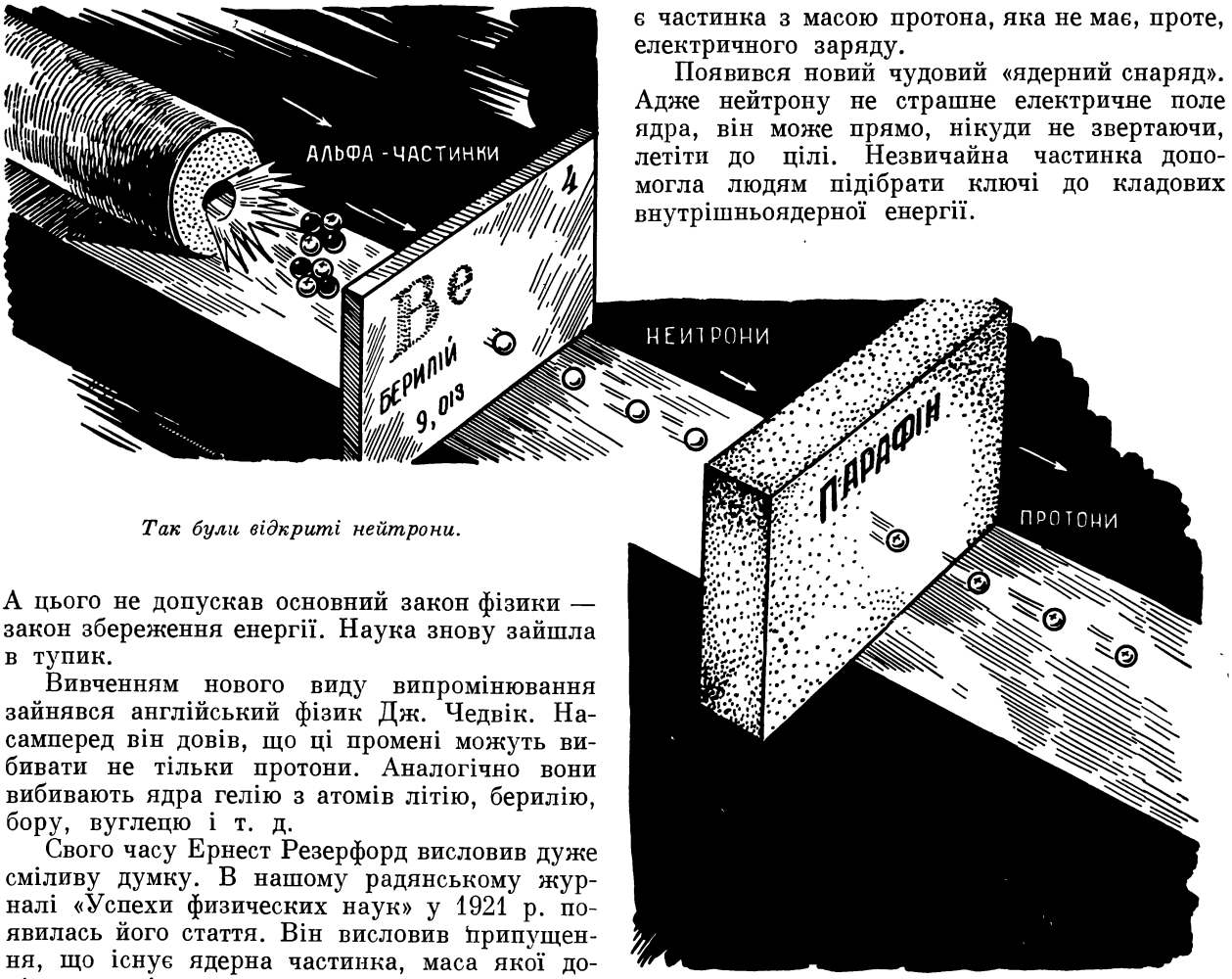
У 1930 р. німецькі фізики В. Бете і Г. Беккер помітили, що два легких елементи — літій і берилій — не підлягають цьому правилу — вони не випускають протонів під впливом альфа-частинок. Учені багато разів повторювали експерименти і щоразу переконувалися в тому, що протонів при цьому не появляється. Одночасно вони звернули увагу на те, що під час цієї реакції літій і берилій починають щось випромінювати. Аналогічне випромінювання давав ще один підданий альфа-бомбардуванню легкий елемент — бор. Випромінювання це не могли затримати потужні екрани, які майже цілком вбирали навіть найбільш проникаючі — жорсткі гамма-промені.

Це було зовсім дивно. Найбільш жорсткі гамма-промені від відомих у той час радіоактивних джерел — гамма-промені торію-С — наполовину вбиралися шаром свинцю в 1,5 *см*. А для берилієвого випромінювання ця величина становила не багато й не мало — 5 *см*!

Дослідники прийшли до висновку, що нововідкрите випромінювання повинно містити в собі гамма-промені колосальної енергії. Це здивувало вчених. Багато хто з них твердив, що поява гамма-променів такої енергії неможлива.

Видатні французькі вчені Фредерік Жоліо і Ірен Кюрі поставили досліди, які показали, що ядра легких елементів під впливом альфа-частинок не можуть випускати таке потужне гамма-випромінювання. Вчені довели, що гадані гамма-промені поводилися зовсім незвичайно. Вони вибивали з парафіну ядра водню — протони, що в ньому містилися, причому пробіг цих протонів був дуже великий.

Коли підрахували енергію гамма-променів, необхідну для того, щоб вибити протони з такою енергією, то виявилося, що вона повинна ще в десять раз перевищувати енергію, розраховану за вбиранням цих променів у свинці.



Так були відкриті нейтрони.

А цього не допускав основний закон фізики — закон збереження енергії. Наука знову зайшла в тупик.

Вивченням нового виду випромінювання зайнявся англійський фізик Дж. Чедвік. Насамперед він довів, що ці промені можуть вибивати не тільки протони. Аналогічно вони вибивають ядра гелію з атомів літію, берилію, бору, вуглецю і т. д.

Свого часу Ернест Резерфорд висловив дуже сміливу думку. В нашому радянському журналі «Успехи физических наук» у 1921 р. появилась його стаття. Він висловив припущення, що існує ядерна частинка, маса якої дорівнює масі протона, а заряду немає. Резерфорд, що почав у той час свої експерименти з «сучасної алхімії», мріяв про цю нову частинку. Він говорив: «Такий атом мав би зовсім фантастичні властивості... Він повинен мати здатність вільно проходити через матерію...»

І багато років великий учений затратив на шукання цієї таємничої частинки. Проте ні він, ні його помічники так і не знайшли її, бо шукали зовсім не там, де вона могла бути.

А от Бете і Беккер і Жоліо-Кюрі, а за ними Чедвік справді виявили цю частинку. Нейтрон було відкрито.

Саме нейтрони вилітали з ядер берилію, обстрілюваних альфа-частинками.

Чедвік показав, що маса нейтрона не відрізняється помітно від маси протона. І тоді все стало зрозумілим. Мав рацію Резерфорд: є частинка з масою протона, яка не має, проте, електричного заряду.

Появився новий чудовий «ядерний снаряд». Адже нейтрону не страшне електричне поле ядра, він може прямо, нікуди не звертаючи, летіти до цілі. Незвичайна частинка допомогла людям підібрати ключі до кладових внутрішньоядерної енергії.

БУДОВА ЯДРА

Відкриття нейтрона дуже допомогло фізикам-теоретикам. У 1932 р. радянські вчені Е. Н. Гапон і Д. Д. Іваненко і паралельно з ними німецький фізик Гайзенберг запропонували дуже просту картину будови ядер різних атомів, яка задовільно пояснювала все незрозуміле, що було зв'язано з частинками, які входять до складу атомного ядра.

За цією теорією, всі ядра складаються з двох видів частинок — протонів і нейтронів. Число протонів відповідає атомному номерові елементу, а різниця між атомною вагою і порядковим номером є якраз число нейтронів у цьому ядрі.

Але як тоді пояснити явище бета-розпаду? Звідки в ядрі появляються електрони? Запи-

тання цілком резонні. І тут вияснилось: електрони утворюються в ядрі. І бета-розпад можна уявити собі таким чином, що в одному якомусь ядрі нейтрон перетворюється в протон. При цьому появляється електрон, який не може лишитися в ядрі. Він і вилітає назовні у вигляді бета-частинки.

Можливий і зворотний процес: протон захоплює електрон і перетворюється в нейтрон. В результаті такої реакції атомний номер повинен на одиницю зменшитися. Процес цей називається *К*-захопленням.

Але звідки ж протон може захопити електрон? Найближче до ядра знаходяться електрони внутрішньої оболонки атома. Саме з неї і відбувається це захоплення.

Іноді ядра викидають позитивні електрони, що називаються позитронами. І позитронний розпад теж легко пояснити. Протон при цьому перетворюється в нейтрон. І ядро виділяє вже не негативний, а позитивний електрон.

При всіх цих процесах відбуваються перетворення протона в нейтрон або навпаки. Маса частинки при цьому майже не змінюється. Тому іноді зручно протони і нейтрони називати нуклонами і вважати, що нуклони можуть існувати всередині атомного ядра у двох станах — протонному і нейтронному. Перехід одного з цих станів у другий завжди супроводиться випусканням або вбиранням звичайних електронів або електронів з позитивним зарядом — позитронів.

Усі хімічні властивості елементу зв'язані з його позитивним зарядом. А різні різновидності атомів елементу — ізотопи — різняться тільки числом нейтронів.

У нуклона два стани.

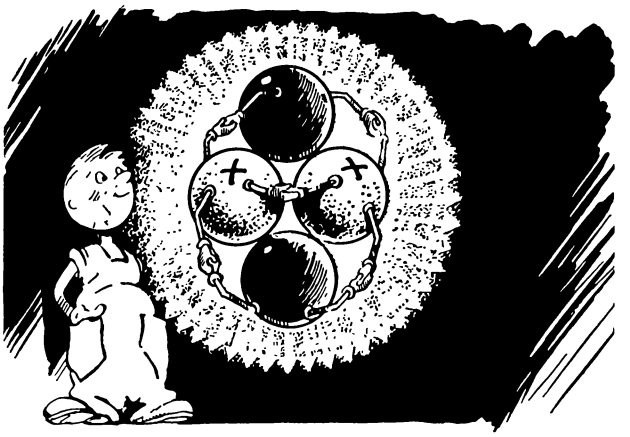
ЯДЕРНІ СИЛИ

Як тільки стало ясно, з яких частинок складається атомне ядро, виникло нове завдання. Тепер треба було пояснити, чому протони і нейтрони удержуються в ядрах атомів і що тримає там ці маленькі частинки матерії.

Особливо незрозуміла поведінка протонів. Як відомо, частинки з однаковим електричним зарядом відштовхуються. Чому ж протони не розлітаються в різні сторони? Чим вони так міцно зв'язані в ядрі? Що їх там тримає? І взагалі, що являють собою ядерні сили, які вдержують частинки разом, створюють таку компактну масу, як атомне ядро?

Ядерні сили діють тільки на дуже малих відстанях від ядра атома (які можна порівняти з діаметром ядра). Далеко від нього їх дія зовсім не відчувається. Крім того, ці сили діють між усіма частинками, що утворюють ядро: і між нейтроном і протоном, і між двома нейтронами, і між двома протонами.

Модель атома берилію.



Ядерні сили діють на дуже малих відстанях від ядра.

Теорії ядерних сил, чіткої і ясної, немає ще й тепер. Дуже багато є незрозумілого. Характер ядерних сил визначено тільки наближено. Створення закінченої теорії ядерних сил — справа майбутнього.

РАДІОАКТИВНІСТЬ ВИКЛИКАНА ЛЮДИНОЮ

Відкриття нейтронів створило нову еру в фізиці ядра. Буквально всі лабораторії, де вивчалась будова речовини, просто-таки «накинулись» на нейтрон. І визначні відкриття посипались, як з рогу достатку. Найвизначнішим з них було, безперечно, відкриття штучної радіоактивності. Сталося це так.

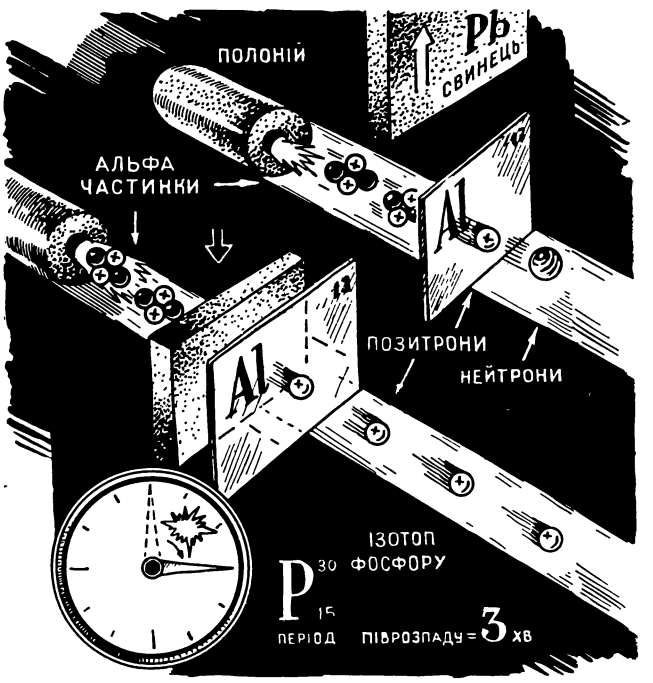
Ірен і Фредерік Жоліо-Кюрі, як і багато інших вчених, почали вивчати взаємодію легких елементів з альфа-частинками. Вони спостерігали випромінювання нейтронів. Серед інших елементів молоді фізики бомбардували і алюміній. При цьому, як і слід було сподіватися, виділялись нейтрони. Але разом з нейтронами алюміній випромінював якісь легкі частинки. Відхилення в магнітному полі показало, що це — позитрони. Це був перший випадок, коли позитрони виявили в лабораторії. До цього вважали, що вони утворюються тільки в космічних променях.

Уже само по собі це було відкриттям. Але найцікавіше було в іншому. Нейтронне випромінювання легких елементів зникало, як тільки їх переставали обстрілювати альфа-частинками. Це було цілком природно і не викликало ніяких сумнівів. Звідки б узятися нейтронам, якщо немає альфа-частинок?

Але ось алюміній, що випускає під впливом альфа-частинок нейтрони і позитрони, відокремили від джерела альфа-частинок (в експериментах Жоліо-Кюрі цим джерелом був препарат полонію) спеціальним екраном. Випромінювання нейтронів негайно припинилось. А позитрони продовжували виділятися. З часом їх виділення помітно зменшилось. Через деякий час воно зовсім зникло. Вчені повторили експеримент. Вони переконалися, що під впливом альфа-частинок полонію в алюмінії утворилась якась речовина, що випускає позитрони. Виявилось, що період напіврозпаду цієї речовини дорівнює 3 хв.

Тоді подружжя Жоліо-Кюрі почало спостерігати, чи не випромінюють позитрони і інші легкі елементи. І виявили, що подібно до алюмінію поводилися бор і магній. Тоді вони опублікували здобуті результати, зробивши висновок, що під впливом альфа-частинок у різних елементах відбуваються складні ядерні реакції. В результаті їх випромінюється нейтрон, а ядро, що залишилося, виявляється нестійким і розпадається, випромінюючи позитрони.

Це було відкриття величезної ваги. Практичне значення його важко переоцінити. Людство дістало можливість штучно виготовляти різні радіоактивні речовини, такі потрібні і



Відкриття штучної радіоактивності.

медицині, і іншим наукам. Добуті радіоактивні ізотопи стали називати радіоелементами.

Тепер штучно створені радіоактивні елементи займають почесне місце в найрізноманітніших галузях науки і техніки. Відкриття радіоактивних ізотопів дало новий поштовх до проведення різних експериментів з ядерними перетвореннями. Незабаром молодий італійський вчений Енріко Фермі проробив у Римі цілу серію дуже важливих дослідів з нейтронами.

Він піддав бомбардуванню цими частинками буквально всі елементи періодичної системи Менделєєва. Тут саме і «посипались» радіоактивні елементи. Виявилося, що майже всі елементи під впливом нейтронів стають радіоактивними.

Величезну кількість радіоелементів створено тепер з допомогою нейтронів. Треба тільки мати потужне джерело нейтронів, а потім підставити під їх удари потрібну речовину. Нейтрони бомбардують ядра атомів, все більше й більше стає радіоактивних ядер. Але ось встановлюється рівновага. Скільки нових радіоактивних ядер утворюється, стільки ж їх і розпадається. Більшої активності вже не можна мати.

Таким чином, все залежить від потужності нейтронного джерела. Чим більше нейтронів воно може дати за одиницю часу, тим потужнішим буде і радіоактивне джерело, виготовлене із стабільних елементів. Тепер учені добувають радіоактивні ізотопи не тільки з допомогою нейтронів, але й ряду інших частинок.

ЯК ЗНЯТИ ШАПКУ-НЕВИДИМКУ

Ми багато говорили про різні досліди, що їх ставили вчені з радіоактивними речовинами, з ядерними частинками і ядрами різних елементів. Але при цьому ми обминали питання про те, які ж способи виявлення частинок вони застосовували, якими приладами користувалися. А цих приладів дуже багато, і кількість їх збільшується з казковою швидкістю.

Про розміри частинок ми вже говорили. Вони такі малі, що побачити їх ніколи не буде можливості.

Тому з самого початку вчені намагалися реєструвати не саму частинку, а тільки факт її проходження в певному середовищі, її слід.

Треба сказати, що техніка вимірювань зростала разом з відкриттям нових явищ. Одне ніби змушувало і підстьобувало інше. Треба було реєструвати політ альфа-частинок — було створено екран з сірчистого цинку. А з допомогою вкритої сірчистим цинком пластинки Резерфорд проробив свої знамениті досліди по розсіянню альфа-частинок.

Спінтарископ давав можливість підраховувати число альфа-частинок, випромінюваних радіоактивним препаратом. Вчені буквально сиділи і лічили спалахи, лічили частинки, що попадали на екран. Це, звичайно, робота дуже стомлива, та й результати не завжди виходили точні. Крім того, багато залежало від зору самого вченого: скільки він бачив частинок, стільки і реєстрував.

Тепер спалахи лічить уже не людина, а спеціальний складний прилад — сцинтиляційний лічильник.

СТОЛОВИЙ ПРИБОР

На одній науковій конференції демонструвався зовсім не звичайний пристрій. Виделка і ніж, затиснуті у звичайні штативи, кілька електричних батарей і електромагнітний лічильник, що підраховує імпульси струму, які виникали. Як тільки до цієї дивної споруди підносили радіоактивне джерело, лічильник починав клацати.

Виделку і ніж можна було замінити якими завгодно металевими предметами, скажімо, навіть звичайними цвяхами. Однаково! Оригінальний прилад акуратно підраховував би заряджені частинки, що попадали між цвяхами. Що це за прилад?

Два металеві предмети правлять за електроди. До них підведено електричну напругу, але між електродами є повітря. Тому струму в електричному колі немає. Припустимо тепер, що між електродами пройде заряджена частинка. На своєму шляху вона створить масу іонів, і повітря стане провідним. От і вийшов пристрій, що називається іонізаційною камерою. Звичайно, справжні вимірювальні прилади запаяні, повітря або іншого газу в них небагато. Але, по суті справи, вони нічим не відрізняються від жартівної конструкції з ножа і виделки.

Багато частіше для реєстрації окремих частинок застосовують лічильник Гейгера. Це — найбільш поширений вимірник різних ядерних частинок. З його допомогою можна реєструвати всяку частинку. Від неї вимагають тільки одного — щоб вона попала всередину лічиль-

ника і створила там трохи іонів. Напруга на лічильнику Гейгера дуже велика. Розганяючись під впливом цієї напруги, іони на своєму шляху зривають електрони з оболонок нейтральних атомів, що їх вони зустріли, і створюють грандіозну іонну лавину. Створюється такий потужний струм, що його вже легко виміряти звичайними приладами.

Іонізаційний лічильник Гейгера.

Лічильники Гейгера дають можливість проводити дуже цікаві спостереження над різними частинками, що летять до нас з глибин світового простору. Ці дослідження набрали особливо широкого розмаху після запуску штучних супутників Землі.

Надзвичайно важливо знати напрям поширення космічних частинок. Для того щоб визначити напрям польоту частинки, користуються не одним лічильником, а цілою групою. Існує «хитра» радіосхема, що називається схемою збігів. Скажімо, сполучено за такою схемою три лічильники. Спрацює вона тільки тоді, коли частинка пролетить через усі три лічильники. Тоді ми точно можемо сказати, як саме ця частинка пролетіла, показати її шлях у просторі.

А для того щоб точніше це зробити, щоб не сплутати напрям польоту однієї частинки з напрямом польоту кількох, застосовують ще одну схему, що називається схемою антизбігів. Там, навпаки, частинка, що пройшла через два або кілька лічильників, не зареєструється. Застосовуючи поєднання цих схем, можна дуже точно підрахувати кількість різних частинок, що бомбардують під різними кутами нашу планету. Таку будову й мають «телескопи» для реєстрації космічних частинок.

ТУМАН ДОПОМАГАЄ БАЧИТИ

В численному ряді вимірників ядерних частинок є чудовий пристрій, який Резерфорд назвав «найоригінальнішим і найбільш дивним інструментом в історії науки». Це — камера Вільсона.

Англійський вчений Вільсон працював над питанням утворення туману. Він виявив цікавий факт — туман дуже добре утворюється, якщо в повітрі є порошинки. Повітря містить у собі водяну пару. Як тільки температура повітря падає, частина води повинна випасти з нього, бо в ньому при певній температурі може міститися тільки точно певна кількість водяної пари.

Водяна пара конденсується у вигляді найдрібніших крапельок. Особливо легко відбувається конденсація на порошинках. Як кажуть, вони є центрами конденсації, центрами утворення крапельок.

Та не в цьому основна заслуга Вільсона. В цих дослідженнях він тільки повторив те, що до нього вже здобули інші вчені. Але Вільсон показав, що не тільки навколо порошинок можуть утворюватися крапельки води або якоїсь іншої рідини, пара якої є в повітрі. В деяких умовах цими центрами можуть бути...

іони! Їх самих не видно, їх розміри дуже малі. А от краплі, що збираються на цих іонах, можна дуже добре побачити.

Ви, мабуть, уже зрозуміли, в чому суть ідеї Вільсона. Адже на шляху зарядженої частинки утворюється ціла хмара іонів. Навколо них починають утворюватися крапельки туману. Якщо це станеться швидко, то іони, що утворилися на шляху частинки, не встигнуть далеко відійти від того місця, де вони утворились. І тоді в повітрі буде видно слід частинки. Так, таким чином можна побачити слід тієї самої частинки, яку природа з самого початку прирекла на невидимість!

А слід частинки можна сфотографувати. І це буде вже цілком реальний доказ наявності того чи іншого ядерного процесу, появи тієї чи іншої частинки. Камера Вільсона недарма називається «суддею ядерної фізики». Це цілком слушна назва. Скільки теорій розбилось під час перевірки цим досконалим апаратом, скільки несподіваних відкриттів підтвердилось завдяки їй! Важко сперечатися з «автографом природи» — так можна назвати знімки, зроблені в камері.

Починаючи з експериментів Резерфорда, всі відкриття ядерної фізики перевірялись в камері Вільсона. Саме тут підтверджено відкриття нейтрона, тут відкрили позитрон, тут вивчали різні ядерні реакції, тут одержали знімки всіх новітніх частинок.

Є величезна кількість найрізноманітніших конструкцій цього чудового приладу. Принцип дії всіх їх один і той самий. В якийсь момент у камері відбувається адіабатичне розширення. Газ, яким вона наповнена, охолоджується, пара рідини починає конденсуватися. Якщо в цей момент через камеру пролетіла якась заряджена частинка, то на іонах її сліду почнеться утворення крапельок. В момент розширення камери включається фотоапарат.

Знімок дає картину, яка була в камері в момент знімання. Якщо в цей час летіла частинка, то її слід ми побачимо і на знімку.

Для спостереження за різними ядерними реакціями треба наповнити камеру відповідним газом, що містить у собі ядра, які нас цікавлять. А потім уже на знімках утворюються різні взаємодії з цими ядрами.

Акад. Д. В. Скобельцин, якого ми всі знаємо як видатного вченого і громадського діяча, дуже багато працював з камерами Вільсона. Він запропонував цікаве вдосконалення, назване в науці його ім'ям.

Метод Скобельцина полягає в тому, що камеру Вільсона ставлять у сильне магнітне поле. Сліди частинок викривляються. Це викривлення залежить від величини і знака заряду частинки. З допомогою цього пристрою зараз вивчають різні заряджені частинки. Цей пристрій дає можливість точно визначити масу частинки і величину її заряду.

А ось ще одна камера дуже простої будови. Для неї не потрібно спеціального, дуже склад-

«Телескоп» для реєстрації космічних частинок.

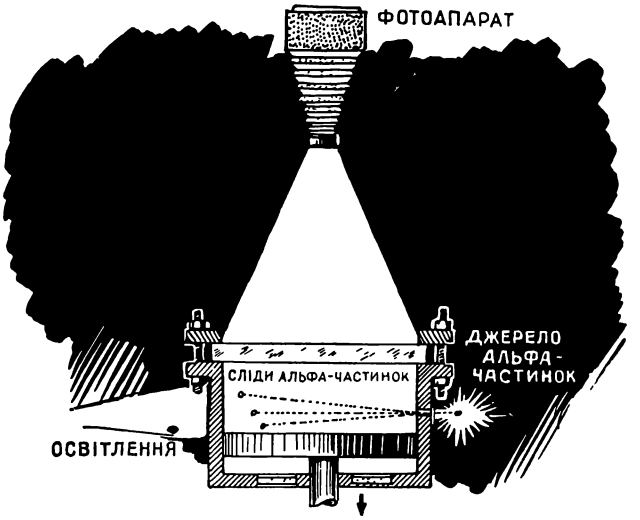


Схема камери Вільсона.

ного механізму розширення. Для неї не існує і так званого «часу відновлення» — часу, за який камера ніби отямлюється: в ній відновлюється нормальний стан газу, опадають крапельки, встановлюється нормальний тиск. Ця камера діє весь час, і називається вона д и ф у з і й н о ю к а м е р о ю.

Цей пристрій дуже простий. Його цілком можна виготовити у шкільних умовах.

Уявіть собі банку, звичайнісіньку банку. Зверху її підігрівають, а знизу охолоджують. Газ іде зверху вниз. Але приблизно в середині камери, де холодніше, починається конденсація частинок рідини, які в ній є. Така камера діє весь час, тільки встигай фотографувати.

Однак найцікавіша камера — це, звичайно, керована камера Вільсона. Тут знімки робляться не всліпу, камера ніби сама знає, що вона повинна фотографувати.

Ось на великому лабораторному столі стоїть досить складна установка. Посередині ви бачите вже знайому нам звичайну камеру Вільсона. Біля неї теж знайомі лічильники Гейгера. Два лічильники — по одному з кожного боку. А коло самої установки нікого немає. Люди сидять зовсім в іншому кутку кімнати і ніби чогось чекають. Минає деякий час, почулось характерне клацання, і вмить спалах світла осяває кімнату. Це спрацювала камера. Сталося розширення, засвітилося світло сильної лампи, і клацнув фотоапарат. Але хто подав сигнал, хто ввімкнув усі ці прилади?

Їх увімкнула частинка, та сама, слід якої був щойно сфотографований. Недаром він тягнеться через весь знімок.

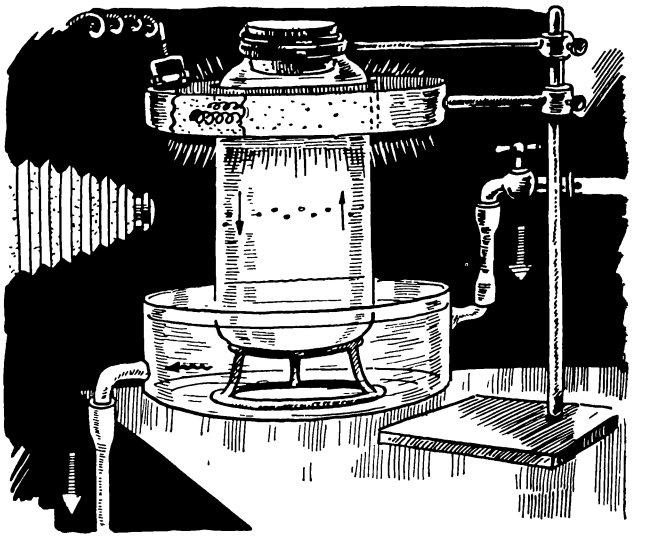
Але як же така маленька, слабенька частинка, що має таку мізерну масу, зуміла сама включити громіздку апаратуру? Дуже просто: їй допомогла схема збігів. Лічильники, що стоять по боках камери, сполучені на збіги. Як тільки частинка проходить через обидва лічильники, а отже, і через камеру, схема спрацьовує, примушує включитися розширювальний механізм, лампу, фотоапарат і т. д.

Одним словом, частинка сама себе фотографує. Ось що таке керована камера Вільсона. З її допомогою можна визначати частинки, розрізняючи їх за знаком, величиною заряду і енергією, можна спостерігати різні ядерні реакції. Цей чудовий прилад всюди використовують в лабораторіях для наукових досліджень.

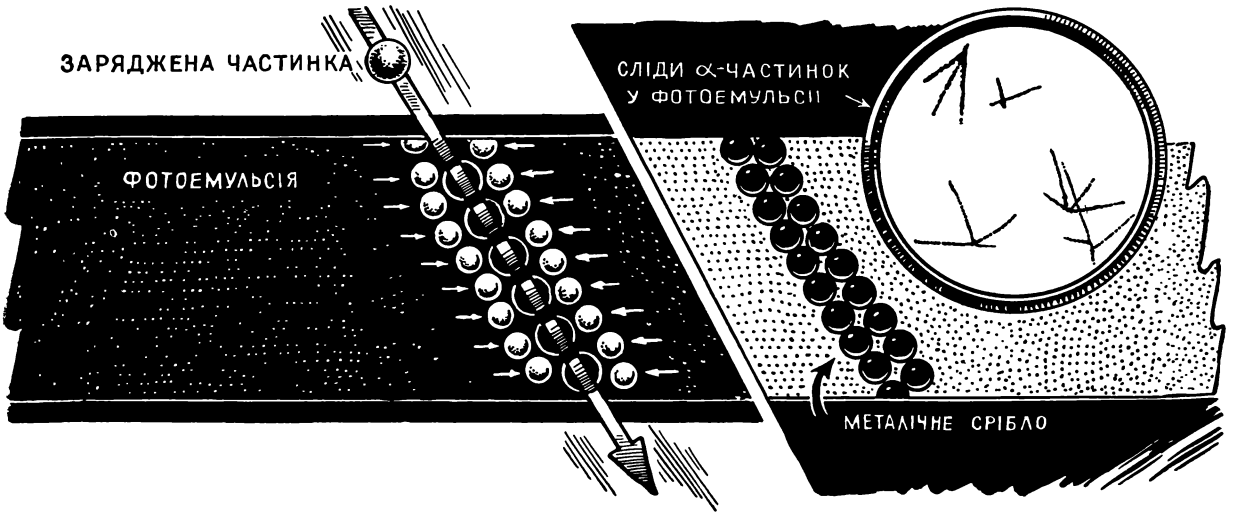
РІЗНОМАНІТНІ МЕТОДИ

Ядерні частинки реєструють не тільки за допомогою іонізаційних приладів, камер Вільсона і сцинтиляційних лічильників. Зовсім ні! За останній час створено дуже багато найрізноманітніших установок, які вимірюють заряд, масу і кількість частинок, що пролетіли. Ось деякі з них.

Відкриття радіоактивності почалось з того, що Анрі Беккерель поклав кусочок уранової руди на старанно загорнуту в чорний папір фотопластинку. І з того часу одним з найбільш поширених методів реєстрації ядерних час-



Дифузійна камера.



Заряджена частинка в фотопластинці.

тинок став метод фотопластинок. Але ці пластинки, звичайно, різко відрізняються від тих, до яких ми звикли при звичайному фотографуванні.

Радянські вчені Л. В. Мисовський і Г. Б. Жданов створили сучасні методи використання фотоемульсій у ядерній фізиці. Товщина цих емульсій доходить до сотень мікронів.

Як же працює фотопластинка, як вона допомагає реєструвати ядерні частинки?

Коли заряджена частинка проходить крізь фотоемульсію, на її шляху утворюються іони. Ці іони є центрами проявлення — навколо них відкладається металічне срібло. При проявленні видно напрям, по якому пролітає частинка.

Чим особливо добра фотопластинка для вивчення різних ядерних процесів? Пролетіла одна частинка, слід її залишився всередині пластинки захованим. Тому пластинка цілком придатна для фіксації інших частинок. Таким чином у фотоемульсії можуть нагромаджуватись сліди різних частинок, різноманітних ядерних реакцій.

Вони не заважають один одному. Але ось пластинку проявлено. За величиною сліду, за числом зерен (чорні проявлені точки на пластинці) ми можемо судити і про заряд, і про швидкість частинок. Крім того, таким способом можна визначати і масу частинок.

Кожне нове відкриття ядерної фізики зараз же стає приводом для обміркування: а чи не можна пристосувати його для вимірювальної техніки?

Так сталося і з цікавим відкриттям нашого радянського фізика П. А. Черенкова. Він виявив, що частинки, які поширюються в речовині з швидкістю, більшою за швидкість світла в цьому середовищі, випромінюють. Світіння залежить від швидкості, заряду частинки і речовини, в якій частинка поширюється.

Тому лічильник, запропонований Черенковим, дуже добре вимірює швидкості частинок. А це ж якраз найважче — правильно виміряти швидкість частинки.

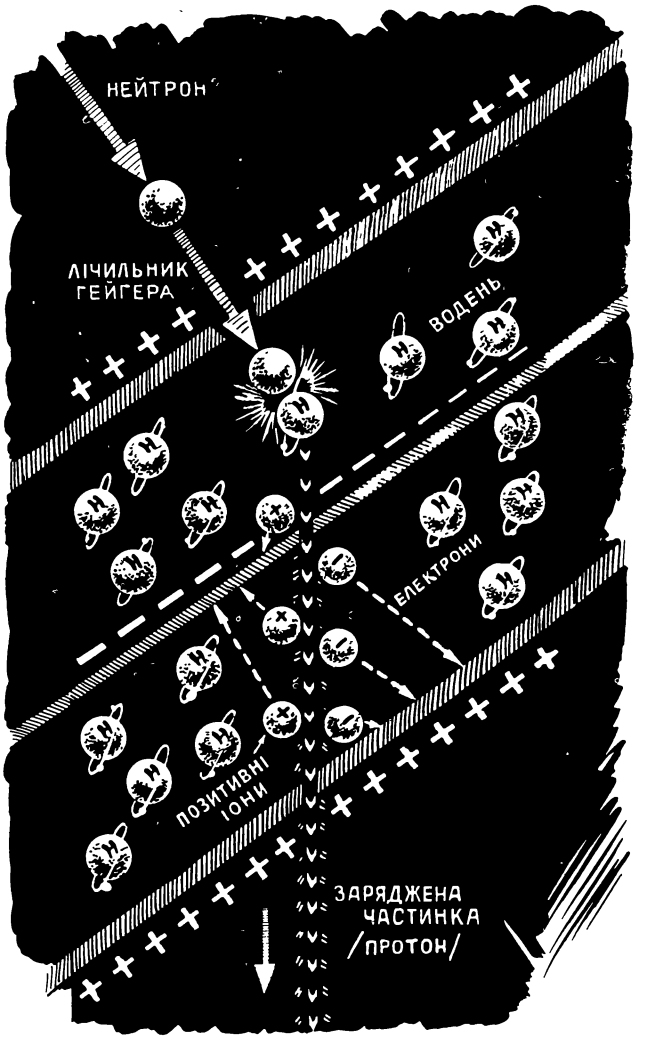
І от, нарешті, ще одна установка, реєстратор ядерних частинок — б у л ь б а ш к о в а к а м е р а.

Пригадаємо, як починається кипіння рідини. Швидко піднімаються вгору бульбашки повітря. А в кожній з них — пара рідини. До цього випаровування відбувалося тільки з поверхні. А тепер випаровування відбувається

Свічення Черенкова.

ся також всередині тих повітряних бульбашок, які завжди є в рідині. Але якщо рідина раніше вже кипіла, та ще й кілька разів, то цих бульбашок у ній буде зовсім небагато, і при звичайній температурі кипіння вже не почнеться. Більше того, можна, обережно підвищуючи температуру, нагріти рідину багато вище точки кипіння. Тоді вона називається перегрітою. Цей стан, як і слід сподіватися, буде нестійким. Найменший струс, поява в рідині хоч би одної бульбашки повітря відразу викликає кипіння. При цьому закипати починає вся рідина одночасно.

Перегріту рідину можна добути ще й іншим способом. При зниженні тиску температура кипіння падає. А якщо тиск знижувати обережно, повільно, перед цим позбавивши рідину бульбашок повітря, то, хоч температура її буде вища від точки кипіння при даному тиску, рідина не кипітиме протягом деякого часу, навіть якщо швидко зменшити тиск.



Реєстрація нейтронів.

І знову-таки центрами утворення пари в перегрітій рідині можуть бути іони, утворені зарядженою частинкою, яка потрапила всередину рідини. Так виникла бульбашкова камера. Будова її дуже проста. Нагріта рідина наповнює скляну посудину. Тиск на одну з її стінок може змінюватися. Якщо тиск зменшити дуже швидко, то може виникнути перегрівання рідини. Тоді на іонах, створених мікрочастинкою, що в цей час пролетіла, починається утворення бульбашок пари.

Звичайно у бульбашкових камерах використовують скраплені гази, ефір, пропан, бензин і т. д. Є камери, що працюють на рідкому водні і азоті. Ці гази знаходяться під великим тиском: інакше з них не добудеш рідини.

Багато різних методів використовують для того, щоб виявити і зареєструвати мікрочастинки. І чим більше існує різних методів, тим легше провести вимірювання, тим точніші результати.

Досі ми весь час говорили про різні реєстратори заряджених частинок. Але ж у практиці часто приходиться мати справу з гамма-випромінюванням або з нейтронами.

Щодо гамма-променів, то з ними справа стоїть зовсім просто. Вони вибивають із стінок будь-яких лічильних пристроїв електрони, які потім реєструються описаними вище способами.

Нейтрони не мають електричного заряду. Тому прилади, що грунтуються на методах іонізації частинками якої-небудь робочої речовини, для них непридатні. Та зате нейтральні частинки дуже активно реагують з цілим рядом різних речовин.

Атом, що захоплює нейтрони, може стати штучно радіоактивним. На цьому і грунтується один з методів їх реєстрації. На шляху потоку цих частинок ставлять пластинку якої-небудь речовини, яка особливо жадібно вбирає нейтрони. І потім, вимірявши величину наведеної активності, судять за цією активністю про кількість захоплених нейтронів.

Стикаючись з легкими ядрами, зокрема з ядрами водню, нейтрони можуть так сильно ударити це ядро, що воно покине атом, стане вільним. Появиться заряджена частинка, на шляху якої почнеться утворення іонів. Значить, наповнивши воднем лічильник Гейгера,

можна реєструвати нейтрони за ядрами віддачі — протонами.

Деякі легкі елементи (бор, літій), захоплюючи нейтрони, випромінюють альфа-частинки. Значить, наповнюючи лічильники боровмісним газом, можна зареєструвати нейтронне випромінювання.

Коротше кажучи, всі описані нами пристрої придатні і для реєстрації нейтронів. Треба тільки в робочу речовину цих приладів ввести речовини, що випромінюють при захопленні нейтронів якісь певні частинки.

КЛАДОВІ ПРИРОДИ

Відкриття Беккереля показало, що в глибині атома є запаси енергії. Заряджені частинки, що звідти вилітають при радіоактивному розпаді, несуть цю енергію. Досліди Кокрофта і Уолтона відкрили для людства ще один шлях звільнення енергії, захованої в атомних ядрах. Цей шлях — ядерні реакції, взаємодія ядер.

Стало ясно, що ядерна енергія справді знаходиться в захованому стані в ядрах атомів різних елементів. Треба тільки навчитися її звідти добувати.

Звільнення внутрішньоядерної енергії — ось корінне завдання сучасної науки. Якщо це завдання буде розв'язано, людство матиме справді невичерпні запаси енергії, такі необхідні йому в наш вік велетенського розвитку техніки.

Є безліч різних ядерних реакцій. Деякі з них супроводяться вбиранням енергії, інші, навпаки, — виділенням енергії. Одну з таких реакцій — р е а к ц і ю д е з і н т е г р а ц і ї (розбиття) літію — якраз і вивчали Кокрофт і Уолтон. Таким чином, в цілому ряді випадків можна звільнити енергію, заховану в надрах атомних ядер.

Але ядерні реакції — явище дуже рідке. Іноді треба послати в ціль тисячі і десятки тисяч ядерних «снарядів», щоб здобути одну таку реакцію. І хоч при такій поодинокій взаємодії і виділиться якась відносно велика кількість енергії, але загальна затрачена енергія буде все ж у багато разів перевищувати добуту.

Щоб зрозуміти, звідки ж береться звільнювана енергія, облишимо процес поділу ядер і займемося трохи арифметикою.

На можливість звільнення внутрішньоядерної енергії вперше вказав видатний учений нашого часу Альберт Ейнштейн. Він показав, що маса і енергія — це взаємозв'язані величини.

Зміна маси ядер реагуючих речовин викликає відповідну зміну кількості енергії. Коротше кажучи, коли маса ядер кінцевих продуктів реакції менша, ніж загальна маса всіх ядер, що брали участь у реакції, то повинна виділитися енергія, і притому не мала. Ця енергія не існує сама по собі — ні, вона обов'язково проявляється як енергія руху мікрочастинок або фотонів.

Кількість енергії, зв'язану з масою, обчислюють так: масу треба помножити на квадрат швидкості світла в пустоті:

$$E = mc^2.$$

Але як же використати цю формулу для того, щоб дізнатися, яка кількість енергії може виділитися при різних ядерних реакціях?

Для цього нам доведеться ввести величину, що називається д е ф е к т о м м а с и. Вона являє собою різницю між масою ядра, яку ми обчислюємо, виходячи з числа нейтронів і протонів, що в ньому містяться, і масою, визначеною експериментально. Завжди, коли відбувається ядерна реакція, треба підраховувати масу реагуючих ядер і масу ядер, що утворилися в результаті реакції.

Такий підрахунок показує, що іноді енергія повинна виділятися при сполученні ядер у більш важкі (синтез), а іноді при їх розбитті на легші (поділ).

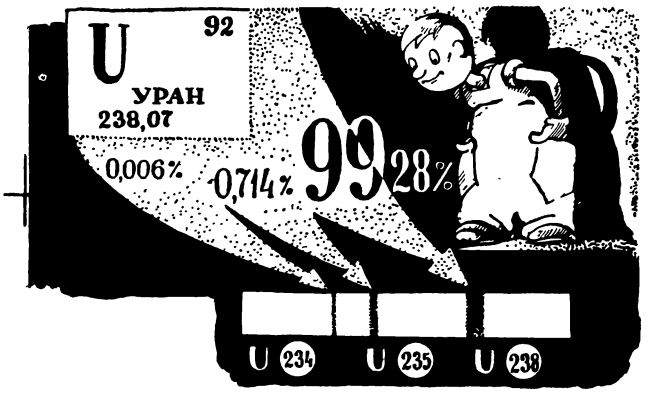
Але спочатку вчені виявили на досліді і реакцію розбиття літію, і реакцію поділу важких ядер, при яких звільнялась енергія. Для того щоб розбити ядро літію, треба було затратити величезну кількість ядерних снарядів. В кінцевому підсумку енергія, що виділилася, виявлялась у багато разів меншою, ніж затрати, які пішли на підривання одного ядра.

У 1934 р. вчені виявили, а в 1939 р., нарешті, пояснили чудову реакцію, в якій справді виділялась внутрішньоядерна енергія, причому відбувалося це без особливих затрат, за рахунок здатності електронів легко проникати в глиб атомних ядер.

Було відкрито поділ урану.

ЗАНАДТО БАГАТО НОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

У тихій лабораторії в Римі група молодих ентузіастів науки під керівництвом італійського вченого Енріко Фермі проводила свої перші досліди. В установці, якою вони кори-



Склад урану.

стувалися, головну роль відігравав великий бак з водою (у воді нейтрони сповільнювались), кілька лічильників радіоактивних частинок і джерело нейтронів.

Оце і все. І з допомогою цієї елементарної установки Фермі зробив стільки відкриттів, скільки не завжди вдається зробити в стінах багатьох першокласно обладнаних лабораторій. Можна собі уявити, з яким трепетом занурював він уранову руду в бак, де блукали нейтрони. І от уран опромінено, його підносять до лічильника бета-частинок. І лічильник показує активність! Під впливом нейтронів уран став бета-активним. Але тоді, виходить, в ньому повинен утворитися новий елемент. Елемент, якого немає в таблиці Менделєєва — трансурановий елемент!

У урану знали тоді три ізотопи — з атомними вагами 234, 235 і 238. Якщо навіть припустити, що кожний з цих ізотопів під впливом нейтронів стає радіоактивним, то могло появитися тільки три випромінювачі. А їх було чотири! Криві розпаду показували наявність зразу чотирьох випромінювачів. Тут було з чого дивуватися.

Уран щонайстаранніше очистили. Було створено всі гарантії того, що активності не можуть створюватися домішками. Крім того, були вивчені різні бета-активні речовини. Серед них не знайшлось жодної, період напіврозпаду якої відповідав би періодам уранового випромінювання.

Почали робити різні припущення, які тут же перевірялись численними експериментами. Насамперед треба було встановити, які ж хімічні речовини появляються в результаті реакції. Тут згодився метод співосадження, запропонований колись П'єром і Марією Кюрі.

У чому полягає суть цього методу? Ізотопи якогось елементу відрізняються один від одного тільки атомною вагою. Число електронів на зовнішній оболонці атома, а отже, і хімічні властивості у них однакові. Цим і користуються вчені. Нехай у якійсь сполуці утворилась певна кількість радіоактивних атомів. Тоді треба розчинити цю речовину і додати до розчину нерадіоактивних стабільних ізотопів шуканого елементу.

Тепер треба якось виділити цей елемент. Хімія знає надзвичайно багато таких способів, так що це зробити неважко. Але тоді разом з стабільними атомами з розчину вийдуть і радіоактивні, що там утворилися. А якщо вони не утворились, то при осадженні ми не матимемо ніякої активності.

З допомогою співосаджувача можна виділити з розчину переважну більшість радіоактивних атомів, які там утворилися, хоч би як мало їх там було.

Пробуючи осадження різними елементами, ми ніби випробовуємо розчин, визначаємо, які випромінюючі ізотопи в ньому містяться. Таким методом почали вивчати і опромінений нейтронами уран. Перепробували безліч елементів — з 86 номера до кінця періодичної системи. Все було марно. Таємничі активності уперто не хотіли осаджуватися.

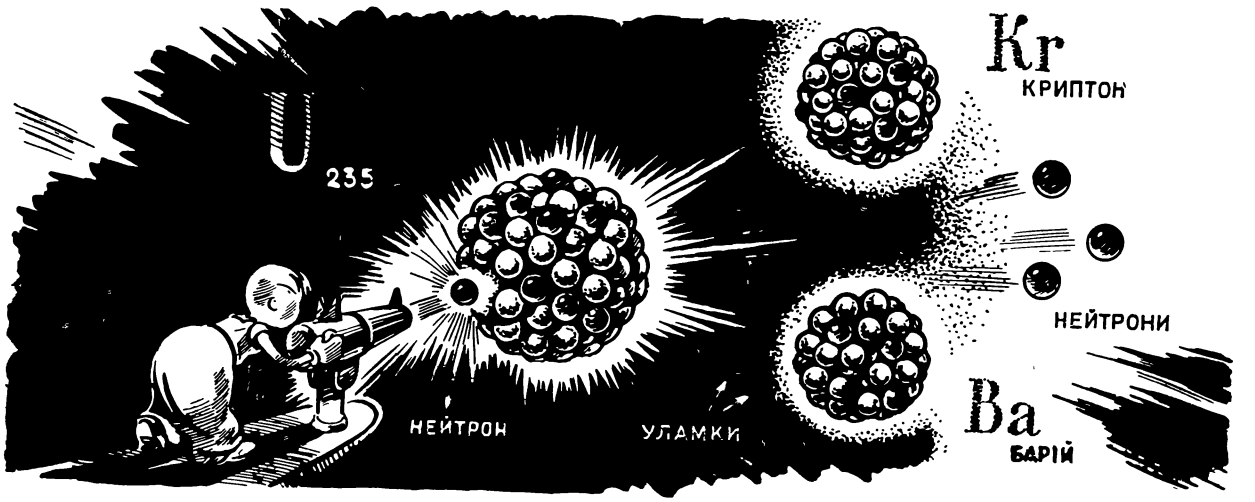
Вчені не знали, що й думати. Що ж все-таки утворювалось в урані? Звідки появились чотири різні періоди напіврозпаду?

А тут ще справа зовсім ускладнилась. Виявилось, що не чотири різні активності утворюються при опромінюванні урану нейтронами, а цілих дев'ять. Жоден теоретик не міг відповісти на питання, які цікавили науку.

ВЕЛИКЕ ВІДКРИТТЯ

Минуло чотири роки, а вчені все ще не могли розібратися в тому, що ж все-таки відбувається в ядрах урану.

У 1938 р. французькі вчені Ірен Кюрі і Савич майже натрапили на розв'язання. Вони знову опромінили нейтронами злополучний уран. Тепер вони виявили нову активність з досі невідомим періодом напіврозпаду. Цей випромінювач вони осадили за допомогою рідкісного елементу — лантану. Але, не посмівши сказати, що в урані утворюється лантан,— елемент, який стоїть у центрі періодичної системи,— вони приписали активність важкому елементові — актинію, який нібито утво-



Поділ ядер урану.

рюється при опромінюванні урану. Дальші спостереження показали, що це не актиній. На шляху науки з'явилась чергова загадка.

Але ж у руках французьких учених справді був лантан. Вони самі злякались чудового відкриття, яке буквально йшло їм у руки.

Німецькі вчені Ган і Штрассман працювали над «урановою проблемою» з самого її виникнення. Їм було зручно працювати разом: Ган був прекрасним хіміком, а Штрассман — фізиком.

Знову на сцені з'явився уран, опромінений нейтронами. На цей раз як осаджувач взяли метал барій. Разом з ним випала в осад і активність. Але через деякий час у цьому осаді появилася ще одна активність, та сама, яку добули Кюрі і Савич. Активності порівнювали за періодом напіврозпаду. Адже у кожного активного ізотопу свій період напіврозпаду.

У періодичній системі елементів Менделєєва барій знаходиться в одній групі з радієм. Тому вчені припустили, що в урані під впливом нейтронів утворюється саме радій. Правда, було абсолютно незрозуміло, як це відбувається.

І от для підтвердження своєї теорії Ган і Штрассман поставили контрольний дослід. Вони розчинили таємничий елемент, одержаний в урані, додали до розчину ізотопів радію і барію і потім розділили ці елементи. Як же вони здивувалися, коли речовина, яка давала таємничу активність, пішла разом з барієм!

Отже, виявилося, що в урані, опроміненому нейтронами, появляється барій — елемент, який знаходиться в середині періодичної системи елементів. Одночасно з ним утворювався інертний газ — криптон. Обидва ці елементи виявились радіоактивними, хоч їх природні ізотопи завжди стабільні.

В урані появлялись не тільки барій і криптон. Там знайшли радіоактивні бром, лантан, йод, телур і багато інших елементів.

Тут уже нічого не лишалося робити: вчені повідомили здивованому світу, що в ядрі атома урану під дією нейтронів відбувається щось неймовірне — він поділяється на два осколки, кожний з яких є радіоактивним ізотопом.

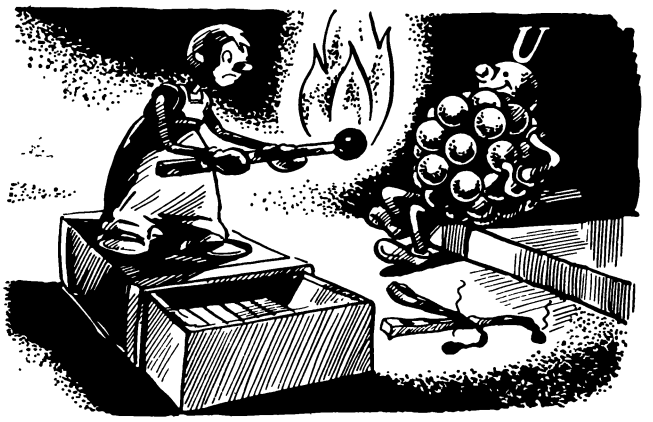
А ізотоп, який знайшли Кюрі і Савич, справді був лантаном. Він появлявся з радіоактивного барію після його розпаду.

Відкриття німецьких учених справило враження вибухлої бомби. Сотні вчених стали повторювати їх досліди і переконувались, що все це не сон, не міраж, а справжня реальна дійсність. Так було відкрито поділ урану.

ПЕРШИЙ ШЛЯХ ДО ЗВІЛЬНЕННЯ ВНУТРІШНЬОЯДЕРНОЇ ЕНЕРГІЇ

Що ж встановили вчені?

Ядра важких елементів, зокрема урану,— скупчення величезної кількості частинок. В ядро урану входить 235 або 238 нуклонів. Тому таке зібрання частинок іноді виявляється недовговічним. Досить тільки одного нейтрона, щоб трапилось несподіване: ядро урану швидко



Щоб запалити атомне багаття, теж потрібні «сірники».

розпадається на дві частини. І обидві половинки — ядра легших елементів — розлітаються в різні сторони, заносячи з собою енергію, що виділилася в цьому процесі.

Так відбувається поділ одного ядра. При цьому виділяється чимала доза енергії. Проте вона велика тільки з точки зору найдрібніших частинок, що беруть участь у реакції. Щоб добути помітний вихід енергії, треба розділити мільйони мільярдів ядер урану. Але де взяти нейтрони для цього?

Щоб запалити багаття, потрібні сірники. А тут постійно потрібні будуть все нові й нові порції таких сірників, треба розбивати все нові й нові ядра урану. Виявилося, що такі нейтрони може дати сам уран. Під час поділу його ядер, крім осколків поділу, виділяється також і кілька нейтронів — від двох до трьох. Щодо первинних нейтронів, які повинні «запалити багаття»— почати реакцію, то їх теж не треба шукати. Ці частинки може дати все той самий уран.

У 1941 р. радянські фізики Г. М. Флеров і К. А. Петржак зробили винятково цікаве відкриття. Вони встановили, що звичайний уран може поділятися сам по собі без впливу будь-яких нейтронів. Він і дасть первинні нейтрони.

Природний уран містить у собі два ізотопи. Це уран-238 (тобто ізотоп урану з атомною вагою 238) і уран-235. Перший ізотоп найбільш поширений, а другого всього тільки $\frac{1}{140}$ частина від загальної маси природного урану.

Коли стали вивчати, якому з них людство завдячує таким чудовим ефектом — поділом, то виявилося, що поділяються обидва ізотопи. Але уран-235 виявився більш «лагідним». Він поділяється нейтронами будь-яких енергій. Йому навіть краще, якщо швидкість нейтрона невелика. Але ядер урану-235 дуже мало. А для поділу більш поширеного урану-238 потрібні нейтрони дуже великих енергій. Більш повільні нейтрони, що мають порівняно невеликі швидкості, для цього вже непридатні. Нейтрони, що появляються під час поділу, під впливом зіткнень з ядрами урану хутко втрачають швидкість і розділити ядро урану-238 уже не можуть. Правда, їх захоплює уран-238 і при невеликих енергіях. Тільки поділу тоді не відбувається, утворюється трансурановий елемент, якого до відкриття поділу урану не знали. Ось що при цьому відбувається. Спочатку уран-238 захоплює нейтрон:

$$U_{92}^{238} + n_0^1 \rightarrow U_{92}^{239}.$$

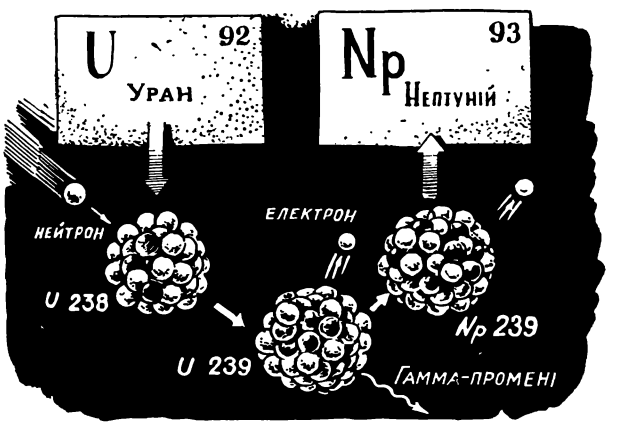
Ізотоп урану (уран-239), що тут утворюється, бета-активний. Він розпадається і утворює трансурановий елемент — нептуній:

$$U_{92}^{239} \rightarrow Np_{93}^{239} + \beta.$$

Нептуній в свою чергу теж бета-активний. Він живе недовго, його період напіврозпаду всього лише 2,4 дня. При цьому виникає ще один трансурановий елемент —знаменитий плутоній:

$$Np_{93}^{239} \rightarrow Pu_{94}^{239} + \beta.$$

Плутоній, так само як і уран-235, дуже добре поділяється під впливом найрізноманітніших нейтронів. В цьому розумінні він дуже цінний елемент.



Утворення трансуранових елементів.

Основний ізотоп, який використовується в ядерних установках,— це уран-235. Чим менша енергія нейтронів, тим краще він їх захоплює. Тому, щоб нейтрони захоплював переважно цей ізотоп, а не ізотоп уран-238, їх треба сповільнити: адже при поділі ядер урану виділяються досить швидкі нейтрони.

Отже, щоб створити установку, в якій звільнялася б велика кількість енергії, треба зібрати докупи багато атомів урану-235 або створити такі умови в природному урані, щоб ядра урану-238 «давали спокій» нейтральним частинкам і щоб їх захоплював тільки уран-235.

Тоді на зміну захопленим нейтронам приходитимуть нові, що звільнилися під час поділу. Все більше й більше число ядер поділиться, все більше енергії виділиться, і все більше появиться нових нейтронів. Так починається ланцюгова реакція.

ЯК ГРУДКА СНІГУ

Уявіть собі, що перед нами якась кількість урану-235. При спонтанному поділі там народжуються нейтрони. Оскільки перед нами уран-235, байдуже, яка в цих нейтронів швидкість. Вони обов'язково поділять ядра урану, і при цьому появляться нові нейтрони. З кожним разом число нейтронів буде все більшим, більше буде і поділів. Як грудка снігу, почне збільшуватися ця нейтронна лавина. В результаті—колосальний вибух. Ось що може статися в урані-235. Так ми з вами на папері створили атомну бомбу, в якій і відбулася неконтрольована ланцюгова реакція.

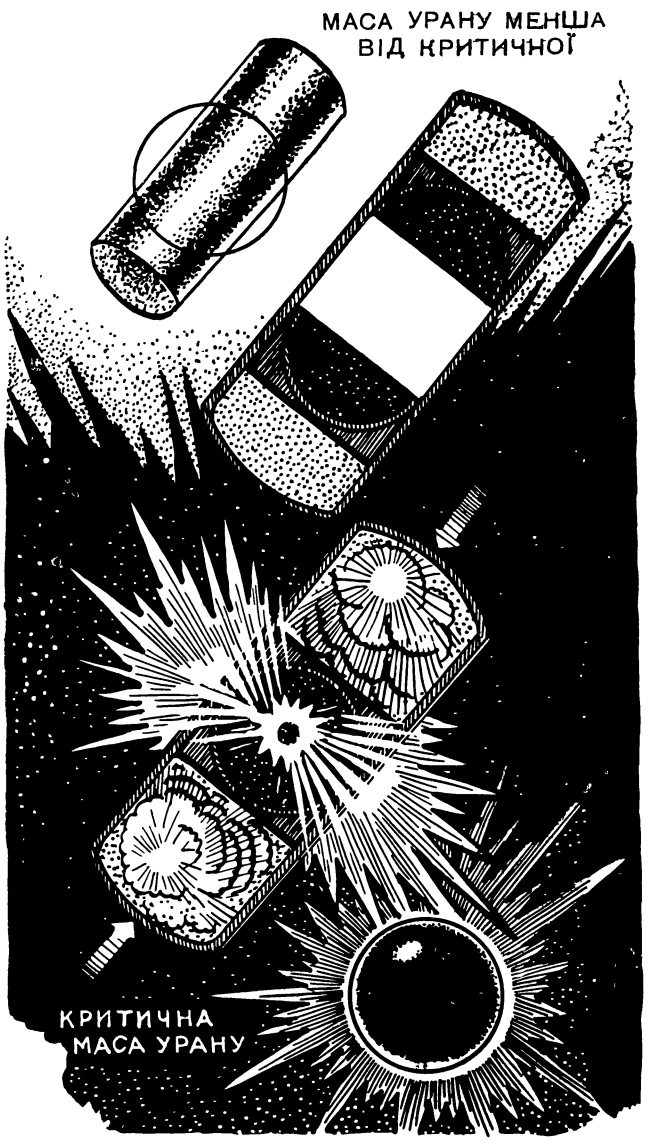
Оскільки вона йде безконтрольно і кінчається вибухом, її використовують тільки у воєнних цілях.

Та чи обов'язково в куску чистого урану-235 виникне ланцюгова реакція, яку вже не можна спинити? Звичайно, ні!

Збільшення числа нейтронів у речовині, що перебуває у процесі поділу, можна характеризувати так званим коефіцієнтом розмноження. Цей коефіцієнт показує, у скільки разів більше появиться нейтронів після вбирання чергової їх порції. Якщо цей коефіцієнт перевищує одиницю, потік весь час зростатиме і настане вибух.

Якщо урану небагато, частина нейтронів виходитиме з нього і вже ніколи не повернеться назад. Тому й вибуху ніякого там бути не може. Така кількість урану, в якій уже може виникнути реакція вибуху, називається критичною масою. Коефіцієнт розмноження в масі урану, меншій від критичної, не досягає одиниці.

Як грудка снігу, розвивається ланцюгова реакція.



Будова атомної бомби.

Але якщо з'єднати дві маси, кожна з яких трохи менша за цю величину, то маса відразу перевищить критичну, коефіцієнт розмноження збільшиться і розвинеться некерована ланцюгова реакція. Станеться атомний вибух.

Як же так? Чому ж тоді не вибухає природний уран, чому він спокійно лежить на складах? Адже десятки тонн цього металу зберігались і зберігаються, не викликаючи ніяких побоювань.

Річ у тому, що в природному урані захоплення нейтронів ураном-238 завжди перевищуватиме поділ в урані-235. Ніколи тут коефіцієнт розмноження не може стати більшим або дорівнювати одиниці.

Ланцюгова реакція в куску природного урану будь-якого розміру неможлива.

Для потреб енергетики, для постійного використання внутрішньоядерної енергії треба створити в урані керовану ланцюгову реакцію. Що це значить?

Раз ланцюгова, значить, вона повинна сама себе підтримувати. Далі йде слово «керована»; воно означає, що реакція не повинна наростати, що число поділів ядер урану не повинно збільшуватися. Ми хочемо добитися такого становища, щоб у кожний момент часу була стала кількість поділів і щоб ми могли на свій розсуд змінювати цю кількість. Захотіли — зробили її більшою, захотіли — меншою. Число поділів — це енергія, яка виділяється в урані за одиницю часу. Значить, йдеться про потужність.

Отже, керована ланцюгова реакція — така, в якій потужність є сталою і в якій ми вміємо цю потужність за нашим бажанням змінювати.

Для звільнення ядерної енергії треба мати «горючий» матеріал. В даному разі ним буде уран. Тепер треба або виділити з природного елементу ізотоп уран-235, або працювати на природному урані. У другому випадку доведеться штучно сповільнювати нейтрони, щоб їх захоплював тільки уран-235. Нейтрони сповільняться при зіткненні з ядром. Чим легше ядро, що зіткнеться з нейтроном, тим більше енергії може він при цьому передати.

Як сповільнювач використовують різні речовини. Найлегші ядра — водневі. Але в них є неприємна «схильність» захоплювати нейтрони. Далі йде важкий водень: ядра його називаються дейтонами, а він сам — дейтерієм. Дейтерій не має неприємної особливості свого легкого собрата, але дуже дорогий. Проте його часто використовують. Він входить до складу дуже поширеного сповільнювача — важкої води. Найчастіше використовують вуглець. Звичайний графіт — не що інше, як чистий вуглець. У вигляді графіту вуглець і використовують у ролі сповільнювача нейтронів.

Крім сповільнювача, нам ще потрібен буде так званий відбивач. Дуже багато нейтронів покидатиме установку, виходитиме з урану, так і не поділивши його ядра. Треба їх затримати. Для цього ще раз підставимо під удари нейтронів ядра сповільнювача. Вони відштовхнуться від них і можуть повернути назад. Установку, яка дає енергію поділу

ядер урану, оточують шаром того ж самого сповільнювача. Тільки називається він тепер відбивачем. Ця назва цілком правильно передає суть його роботи — він відбиває нейтрони, що на нього потрапили. Таким чином, різко підвищується потужність усієї установки.

Називається така установка ядерним реактором, або атомним котлом.

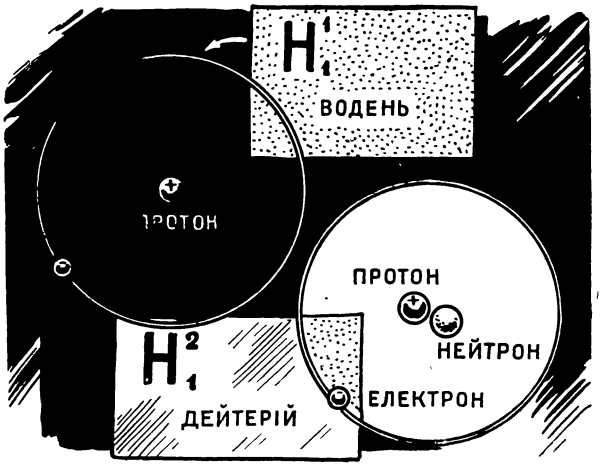
ЩЕ ОДИН КОТЕЛ

До відомих нам котлів, звичайнісіньких котлів різних підприємств побутового обслуговування і котлів теплових електростанцій, приєднався тепер ще один собрат — атомний котел. Що й казати — незвичайний котел!

Реактор має чотири основні частини. По-перше, пальне — уран. Іноді природний уран спеціально збагачують на подільний ізотоп, іноді працюють на звичайному природному елементі. Але в усіх випадках його щонайстаранніше очищають від домішок, які можуть захоплювати нейтрони. Уран може бути і у вигляді стержнів, і в будь-якому іншому вигляді. Це залежить від конструкції атомного котла.

Далі йде сповільнювач. Як ми вже говорили, найчастіше це графіт. Нерідко використовують і важку воду. Відбивач звичайно теж складається з графіту. Але його можна зробити і з різних інших матеріалів.

Крім сповільнювача, відбивача і ядерного палива, в реакторі є так звані регулюючі стержні. Іноді їх називають контролюючими.



Сповільнювачі нейтронів.

Це дуже важлива частина установки. Вони необхідні для контролю за роботою котла і для його регулювання. Крім того, без цих мовчазних сторожів і помічників не можна обійтись і під час пуску реактора. Складаються вони з матеріалів, які добре вбирають нейтрони,— із сполук бору або кадмію.

Реактор працює. Нейтрони справно поділяють визначене їм число уранових ядер, на зміну їм виділяються нові нейтрони, словом, все іде прекрасно, але ось чомусь кількість нейтронів стала збільшуватися. Зразу ж відповідні прилади дали знати про це на пост керування. Стержні трохи опустилися всередину реактора і стали інтенсивніше вбирати

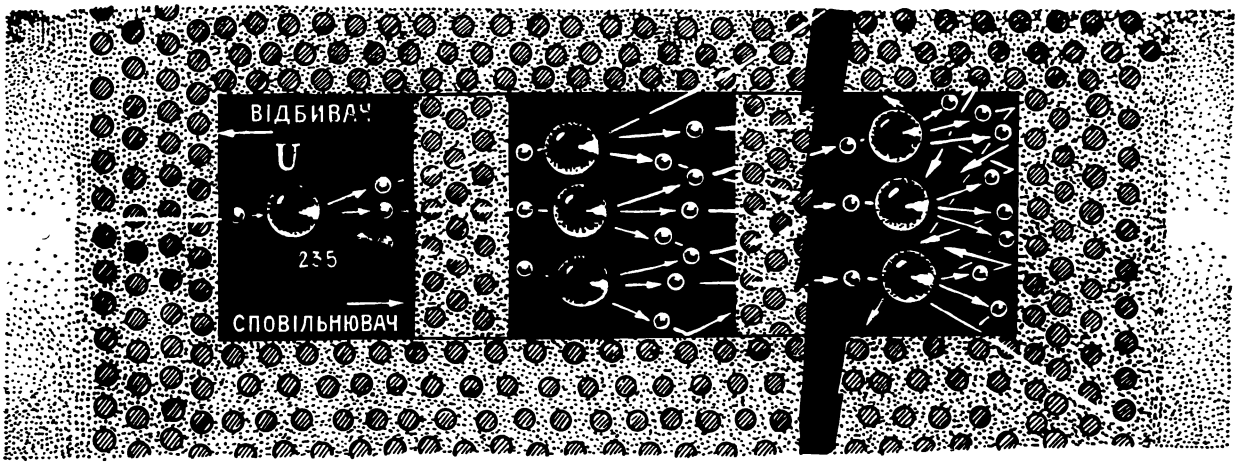


Схема керованої ланцюгової реакції.

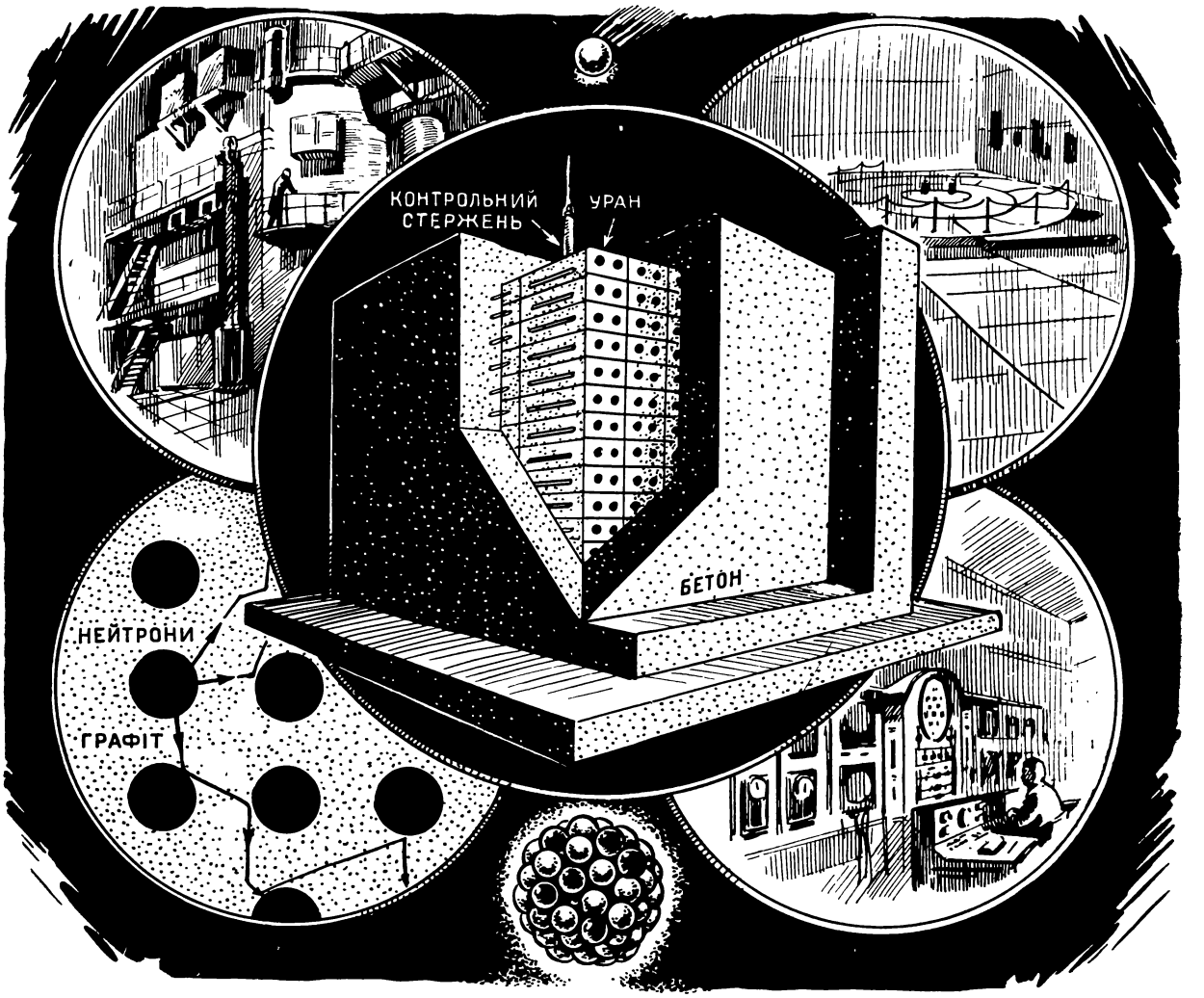


Схема атомного котла.

нейтрони. Рівень реакції — число поділів за одиницю часу — відразу ж спадає до потрібних меж.

Може виникнути і явище протилежного порядку. Котел працює давно, в урані зібралась велика кількість домішок, які вбирають нейтрони, тому потужність реактора трохи зменшилась. Тоді стержні висувають з реактора, вбирання нейтронів зменшується і потужність відповідно збільшується.

Така є будова ядерних реакторів. У цієї важливої споруди, над конструкцією якої так довго билися люди, виявилась така проста будова!

Але ця простота позірна. Тисячі найскладніших завдань довелось розв'язати конструкторам, вченим, інженерам, поки вони створили перші діючі ядерні реактори.

Ми не торкаємося тут різних видів ядерних реакторів. У присвяченому техніці 5-му томі цієї енциклопедії зацікавлені читачі знайдуть їх описи. В цих реакторах застосовують і уран, і плутоній, і ще один важкий елемент — торій.

Атомна енергетика бурхливо розвивається. Величні плани будівництва, накреслені рішеннями Комуністичної партії, відкривають величезні перспективи розвитку перед атомною енергетикою і всією наукою про будову атома в цілому. Наша країна, що проклала шлях

людству в справі мирного використання атомної енергії, в наступні роки зробить новий стрибок вперед в галузі будівництва атомних двигунів для електростанцій, суден та ін. Ще величніші перспективи відкриваються перед реакціями синтезу — сполучення атомних ядер. Але це окрема тема, про неї мова йтиме в дальшій статті.

ТЕРМОЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ В ПРИРОДІ І ТЕХНІЦІ

«Над чим працюватимуть наші вчені в наступний період? Це насамперед оволодіння керованими термоядерними реакціями з метою одержання практично безмежного джерела енергії». Так сказав М. С. Хрущов у доповіді на позачерговому XXI з'їзді КПРС.

Керовані термоядерні реакції — найголовніша проблема сучасної науки. Розповідаючи про її виникнення, суть, шляхи розв'язання, нам доведеться почати здалеку — пояснити причини сяяння Сонця і зір, згадати про таку неприємну річ, як воднева бомба, розібратися в деяких дивних фізичних явищах.

ЯДЕРНИЙ СИНТЕЗ

Чому світить Сонце?

Нелегким було це питання для науки. Яких тільки гіпотез не будували вчені! Одні порівнювали Сонце з брилою палаючого вугілля. Другі думали, що воно розігрівається від ударів метеоритів. Треті вбачали причину нагрівання сонячної речовини в стисненні під впливом сили ваги. Але всі ці припущення довелось відкинути. Вони не могли пояснити неймовірну величину і дивну сталість променистого потоку, випромінюваного Сонцем, потоку, який кілька мільярдів років має незбагненну потужність — півмільйона мільярдів кінських сил. Звідки вона береться? Ще якихось років 30 тому титанічна сонячна сила здавалась нез'ясовною загадкою.

Але наука йшла вперед. Людина проникла в надра речовини, розкрила закони руху найдрібніших частинок матерії. І на кінець 30-х років нашого століття фізики і астрофізики, озброєні знанням глибинних законів матеріального світу, близько підійшли до розгадки вікової таємниці Сонця. Стало ясно, що енергія світила — ядерна, що джерелом її є процес злиття, синтезу легких атомних ядер у важчі.

Як відомо читачеві з попередніх статей, усі атомні ядра побудовані з протонів і нейтронів, зв'язаних особливими силами притягання. Ці ядерні сили діють на дуже малих відстанях, але ці сили величезні. Якби можна було зробити плівку, що поспіль складається із «склеєних» атомних ядер, то при товщині всього в десятитисячну частину міліметра вона була б міцнішою від найтовщої стальної броні. Саме ці могутні сили працюють у процесах ядерного синтезу.

Припустимо для наочності неможливе.

Що станеться, якщо хтось враз зупинить Місяць? Він упаде на Землю, що, звичайно, викличе колосальну катастрофу. У цьому фантастичному прикладі падіння небесних сил спрацювали б сили всесвітнього тяжіння.

Уявімо собі тепер, що ми, стиснувшись у мільярди раз, опинилися у мікросвіті. Тут, піймавши протон і нейтрон, ми зближуємо їх. Ось частинки, підведені на відстань $2 \cdot 10^{-13}$ *см*, «захоплюються» ядерними силами і теж, грубо кажучи, «падають» одна на одну. В результаті «мікрокатастрофи» протон і нейтрон синтезуються, зливаються, утворюючи ядро важкого водню — дейтон.

Подія ця знов-таки супроводиться виділенням енергії, причому відносно величезним, бо ядерні сили, що тут «працюють», надзвичайно великі, незмірно більші від сил тяжіння (рис. 1).

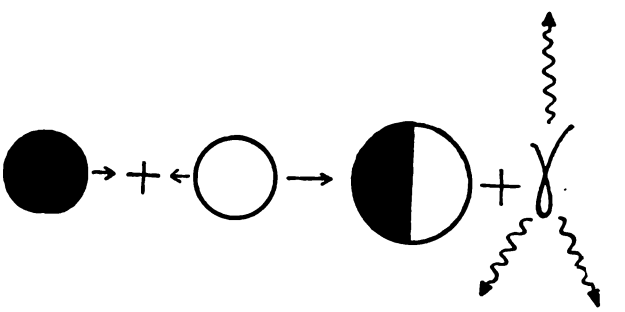


Рис. 1. Протон і нейтрон, зблизившись, зливаються в ядро важкого водню — дейтон. При цій найпростішій реакції ядерного синтезу виділяється велика порція енергії (в формі гамма-кванта).

Треба відзначити, що ядерний синтез частинок супроводиться досить помітним зменшенням їх маси. Якщо маса протона становить 1,00758, а нейтрона 1,00898, то маса дейтона всього 2,01423, що на 0,00176 менше від звичайної суми перших двох мас.

Чому це відбувається?

У фізиці давно відома формула взаємозв'язку маси і енергії, виведена Ейнштейном:

$$E = mc^2,$$

де E — повний запас енергії в тілі (в ергах),
m — маса тіла (в грамах),
c — швидкість світла (що дорівнює $3 \cdot 10^{10}$ *см/сек*).

Формула Ейнштейна вказує на величезний запас енергії, захований у речовині. В копієчній монеті, наприклад, міститься її $9 \cdot 10^{20}$ *ерг*, тобто стільки, скільки може дати за добу могутня Братська гідроелектростанція. Будь-яка зміна енергії тіла викликає зміну маси. Але при звичайних процесах — механічних, теплових, хімічних — ця зміна зовсім не помітна, бо дуже незначна. Зате при ядерних реакціях цей ефект проявляється дуже зримо.

Ядерні сили працюють не тільки при злитті протонів з нейтронами. Вони працюють при перебудовах будь-яких атомних ядер, аби з менш міцних комбінацій частинок утворились більш міцніші. Енергія, що залишилася «безробітною» всередині ядра, неминуче дістає волю і працює поза ним. Справа відбувається так, як коли б ми спочатку «розірвали» ядра на «цеглинки», з яких вони складаються, а потім збудували з тих самих «цеглинок» інші ядра. Якщо на руйнування іде енергії менше, ніж виділяється при дальшому синтезі, то надлишок енергії звільняється. А через те що виділення енергії супроводиться зменшенням маси частинок, то закінчена «будівля» повинна бути легшою, ніж «будівельний матеріал». Маса, що припадає на кожну частинку, у вихідних ядрах обов'язково буде більшою, ніж у тих, що утворюються в результаті реакції.

Зрозуміло, що чим різкіша така різниця, тим вигідніша реакція, тим більше вона звільняє енергії.

Така є в найзагальніших рисах фізична суть синтезу атомних ядер.

Як же збуджуються ці реакції, при яких умовах вони можуть здійснюватися? Природа поставила тут міцну перешкоду.

Для синтезу частинки повинні насамперед впритул наблизитися одна до одної. Без завад це відбувається тільки тоді, коли зливаються протон з нейтроном. Проте такий процес не може бути природним енергетичним джерелом, бо нейтрони — частинки нестійкі, і в природі їх у вільному стані немає. А в усіх інших випадках синтезу повинні взаємодіяти атомні ядра. А вони завжди несуть на собі позитивний електричний заряд і, як однойменно заряджені тіла, уперто відштовхуються одно від одного, ставлячи опір зближенню.

Взаємне відштовхування таке велике, що тільки ядра, які дуже швидко мчать назустріч, можуть, зіткнувшись, пробити електричну броню, добратися до «володінь» коротко діючих ядерних сил і вступити в реакцію синтезу. Це, виявляється, і відбувається в надрах Сонця.

У НАДРАХ СОНЦЯ

Сонце складається головним чином з водню і гелію. Глибоко під зовнішнім блискотливим покривом світила панує температура, що дорівнює приблизно 13 мільйонам градусів. При таких умовах сонячна речовина не може бути подібною до звичайного газу. Атоми, що шалено мчать і ударяються один об одного, вщент розбиваються. Утворюється щільне скупчення осколків атомів — атомних ядер і електронів. Цю суміш фізики називають плазмою.

У глибинах Сонця ядра атомів водню — протони — нерідко налітають один на одного. Часом вони ударяються один об одного з сильного розгону. Проте, незважаючи на величезну температуру і, отже, великі швидкості теплового руху, тільки в дуже рідких випадках (раз на кілька мільярдів років) протони після зіткнення набувають здатності пробити броню взаємного електричного відштовхування.

Цікаво відзначити, що такі події відбуваються не за законами звичайної механіки, яку ви вивчаєте в середній школі. Тісне зближення протонів виявляється можливим, всупереч традиційним уявленням «класичної» фізики. Тут виходить на сцену квантова механіка — наука про рух і взаємодію найдрібніших матеріальних частинок. За законами квантової механіки, атомні ядра набувають здатності наче «прослизати» крізь електричну броню, переборювати її, навіть не маючи для цього достатнього, згідно з уявленнями класичної фізики, запасу енергії.

Уявіть собі двох чоловік, які, поспішаючи один до одного, переплигують кожний через десятиповерховий будинок, що стоїть на їхньому

шляху. Щось подібне відбувається в мікросвіті і з атомними ядрами, що налітають один на одного (правда, в дуже рідких випадках). Це, мабуть, один з найбільш дивних парадоксів мікросвіту. І саме завдяки йому, виявляється, світить Сонце!

Ось як відбувається реакція в надрах світила. В один прекрасний момент, випадково, але з неминучістю, властивою випадку, два протони зближуються один з одним. В середньому раз на 14 мільярдів років один з протонів такої пари, не встигнувши відскочити, перетворюється в нейтрон. Нейтрон і протон, злившись, утворюють ядро важкого водню — дейтон. При цьому випромінюються нові частинки — легкий позитивно заряджений позитрон і майже невловиме нейтрино. Варто відзначити, що існування нейтрино — дивних частинок, які не мають ні маси спокою, ні заряду і рухаються завжди з швидкістю світла, — напочатку було передбачене фізиками-теоретиками і тільки потім доведене на досліді в результаті складних і тонких експериментальних досліджень. Цікаво і інше: невловимі нейтрино виносять, виявляється, досить значну частину енергетичного багатства Сонця. На них припадає близько п'яти процентів енергії сонячного випромінювання.

Отже, два протони в надрах Сонця зливаються в одне ціле.

З кожною парою сонячних протонів таке перетворення відбувається надзвичайно рідко. Але оскільки протонів у глибинах світила незчисленні мільярди, то «черга» для все нових реакцій настає безперервно, і тому ядерний синтез розгортається у величезних об'ємах сонячної плазми.

Утворені ядра важкого водню не довго живуть у надрах Сонця. Менш як через 6 сек. вони приєднують до себе ще по одному «вільному» протону і перетворюються в ядра легкого гелію, а ті, проплутавши в глибинах Сонця в середньому мільйон років, зустрічаються один з одним, щоб злитися і утворити ядро звичайного гелію. При цьому відщеплюються два протони, які виявилися «зайвими».

Водень через три етапи попарних ядерних взаємодій перетворюється в гелій. З легких ядер виникають важчі, з менш міцних — міцніші. Кожний з трьох ступенів процесу супроводиться виділенням солідної порції енергії, яка прискорює частинки або випромінюється у вигляді гамма-променів.

Описаний ланцюжок сонячних реакцій синтезу має назву протонно-протонного циклу. Ось як його записують символічно (з зазначенням кількості виділеної енергії):

$H_1^1 + H_1^1 \rightarrow D_1^2 + \beta^+ + \nu$, виділяється 0,46 *Мев* енергії;

$D_1^2 + H_1^1 \rightarrow He_2^3 + \gamma$, виділяється 5,49 *Мев* енергії;

$He_2^3 + He_2^3 \rightarrow He_2^4 + 2\,H_1^1$, виділяється 12,85 *Мев* енергії.

На думку більшості вчених, саме цим способом наше світило виробляє переважну частину свого променистого багатства. Разом з тим у надрах Сонця відбуваються і інші реакції — так званого вуглецевого циклу.

Справа в тому, що в складі сонячної речовини, очевидно, є дуже незначні домішки атомних ядер вуглецю з атомною вагою 12. І вони можуть бути свого роду посередниками перетворення протонів ядра гелію. Ось як розгортаються події.

У середньому раз на 13 мільйонів років швидкий протон проникає в ядро вуглецю-12 і утворює ядро азоту-13, який приблизно через 14 хв. зазнає радіоактивного розпаду, випромінюючи позитрон і нейтрино і перетворюючись у ядро вуглецю-13. Приблизно через 2,7 млн. років ядро вуглецю-13 захоплює другий протон, що приводить до виникнення стійкого ядра азоту-14. Це ядро в середньому раз у 32 мільйони років може захопити третій протон і перетворитися в ядро кисню-15, яке дуже швидко (в середньому через 3 хв.) викидає позитрон і нейтрино, щоб перетворитись у ядро азоту-15. Нарешті, через 100 тис. років ядро азоту-15 захоплює четвертий протон, викидає ядро гелію і перетворюється в ядро вуглецю-12, з якого і почався весь ланцюжок реакцій.

Записують вуглецевий цикл так:

$C_6^{12} + H_1^1 \rightarrow N_7^{13} + \gamma$, виділяється 1,95 *Мев* енергії;

$N_7^{13} \rightarrow C_6^{13} + \beta^+ + \nu$, виділяється 1,20 *Мев* енергії;

$C_6^{13} + H_1^1 \rightarrow N_7^{14} + \gamma$, виділяється 7,62 *Мев* енергії;

$N_7^{14} + H_1^1 \rightarrow O_8^{15} + \gamma$, виділяється 7,34 *Мев* енергії;

$O_8^{15} \rightarrow N_7^{15} + \beta^+ + \nu$, виділяється 1,68 *Мев* енергії;

$N_7^{15} + H_1^1 \rightarrow C_6^{12} + He_2^4$, виділяється 4,96 *Мев* енергії.

Уважно придивившись до цієї послідовності реакцій, ви переконаєтесь, що вуглецеві ядра в ній не витрачаються. Зате в результаті циклу 4 протони перетворюються в ядро гелію. Інакше кажучи, енергетичний підсумок виходить точнісінько такий самий, як і в протонно-протонному циклі. Підсумок цей колосальний. Синтез кожного грама гелію супроводиться виділенням 175 тис. *квт-г* енергії.

Підтримуючи величезну температуру в надрах світила, енергія ядерного синтезу не дає загаснути грандіозній сонячній пожежі, яка її породжує, і потужними променистими потоками вивільняється назовні.

Треба підкреслити, що злиття атомних ядер в надрах Сонця має деяку подібність до звичайного горіння. Ми підпалюємо сірником купу хмизу, і вона палає, поки не зотліє остання гілка. На Сонці ж «паливо» ядерне. Воно підпалюється високою температурою сонячних глибин, потім ланцюжками попарних ядерних взаємодій захоплюються великі маси речовини, величезна енергія, яка при цьому виділяється, підтримує високу температуру, і «пожежа» триває, поки не вичерпається все «пальне».

Такі процеси в фізиці називаються ланцюговими термоядерними реакціями синтезу. Перша частина слова — «термо» означає, що реакція збуджується діянням тепла, високої температури.

Ви можете спитати, як напочатку виникла сонячна термоядерна пожежа. Адже не міг водень «горіти» вічно. Деякі вчені так відповідають на це запитання.

Колись у далекому минулому існувала хмара холодної розрідженої міжзоряної матерії. Поступово під впливом сили тяжіння вона згущалась, ущільнювалась. Стисненням викликалось підвищення температури (за тим самим законом, за яким нагрівається повітря, стиснене поршнем велосипедного насоса). Нарешті, температура досягла багатьох мільйонів градусів. Отоді й почав розгорятися ланцюговий термоядерний процес синтезу гелію.

До речі сказати, термоядерного пального — водню — на Сонці колосальні запаси. І вистачить його на час, який неможливо навіть собі уявити: приблизно на 100 мільярдів років! Додамо ще, що ланцюгові термоядерні реакції синтезу (причому не тільки гелію, але й інших елементів) — не рідкість у Всесвіті. Саме вони дають променисту енергію зорям. Саме від них починається довга низка енергетичних перетворень, що вливають світло, тепло і життя у все існуюче в природі.

ВОДНЕВА БОМБА

Коли наука розгадала секрет могутності Сонця, коли стали зрозумілими термоядерні реакції, що створюють у надрах зір величезні кількості енергії, фізики стали замислюватись над практичним освоєнням відкритих явищ. І першою подібністю сонячних процесів на Землі був страхітливий вибух водневої бомби — найстрашнішої зброї з усіх, які будь-коли знала історія.

Що треба мати, щоб штучно відтворити синтез легких ядер? Очевидно, насамперед надвисоку зоряну температуру, здатну збудити в речовині ланцюговий термоядерний процес.

Як тільки появилась атомна бомба, стало ясно, що вона цілком може відіграти роль «сірника», що розвиває температуру в мільйони градусів.

А які речовини вона спроможна «підпалити»? Враховуючи, що висока температура розвивається вибухом атомної бомби тільки на зовсім не значну мить — на мільйонні частини секунди, фізики провели ряд досліджень і рекомендували використати як термоядерне пальне ізотопи водню, а пізніше — ізотопи лужного металу літію.

Найпростішу схему водневої бомби можна уявити собі такою. Навколо запалу, що складається із звичайної атомної бомби, розміщається суміш важкого і надважкого водню (дейтерію і тритію), вміщена в оболонку з урану. Коли запал вибухає, ядра ізотопів водню синтезуються в ядра гелію, викидаючи нейтрони і породжуючи вибух.

Мабуть, такою була схема установки, підірваної американцями восени 1952 р. на атолі Еніветок у Тихому океані. Вона являла собою громіздку споруду, складену на високій металевій основі. Вага її дорівнювала приблизно 65 *Т*. Ця «вибухаюча башта», по суті, не могла ще називатися бомбою в загальноприйнятому значенні слова. Її не можна було перевезти, скинути на ціль. Першу водневу бомбу в звичайному значенні цього

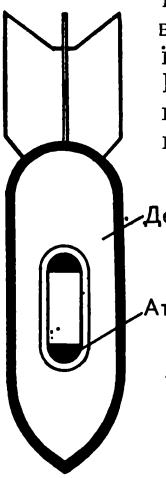


Рис. 2. Одна з можливих схем водневої бомби.

слова створили вчені нашої країни. Її випробували у 1953 р.

Є у термоядерної зброї істотна особливість, яка робить її ще грізнішою, ніж атомна. Потужність водневої бомби, на відміну від уранової або плутонієвої, можна підвищувати дуже сильно, бо термоядерне пальне не вибухає само собою, без попереднього підпалу. Правда, радіус руйнування збільшується з підвищенням потужності бомби не дуже сильно — пропорціонально кубічному кореневі потужності.

Як відомо, уранова бомба, еквівалентна 20 тис. тонн толу, заподіює великі руйнування приблизно на кілометр навколо центра вибуху. У тисячу раз потужніша воднева бомба (еквівалентна 20 млн. тонн толу) руйнує в радіусі не тисячі і не ста, а всього 10 кілометрів. Звичайно, і ця область ураження величезна, тим більше, що смертельні опіки можуть бути і на втроє більшій відстані. Вибух може знести величезне місто.

Вдосконалення ядерної зброї веде до створення все більш і більш потужних водневих бомб. Дійшло до того, що одна-дві сучасні водневі бомби можуть знищити «все або майже все живе на території немалої розмірами європейської держави» (з виступу А. А. Громико на Сесії Верховної Ради СРСР 31 березня 1958 р.).

Але не тільки руйнуваннями і пожежами страшні термоядерні бомби. З численних досліджень ясно, що з кожним новим експериментальним ядерним вибухом все атмосферне повітря забруднюється згубними радіоактивними атомами. Попадаючи в воду, вони отруюють рибу. Осідаючи на земну поверхню, вони незчисленними шляхами проникають у рослини, в організми тварин, людини, створюють можливість захворювань крові, кісткової тканини. Особливо велика небезпека для потомства. Радіоактивне випромінювання може завдати серйозних ушкоджень клітинкам, які дають початок новим живим істотам, так що ті народжуються часом страхітливими потворами.

Ось чому так настійливо лунають голоси розумних людей усього світу, які закликають до заборони цього знаряддя масової загибелі. І в авангарді всенародного руху проти смертельної ядерної загрози стоїть наша Батьківщина. Твердо і послідовно борючись за мир, Радянський уряд багато разів ставив питання про заборону атомних і водневих бомб, про припинення їх випробувань.

У вересні 1959 р. під час історичної поїздки в Сполучені Штати Америки Голова Ради Міністрів СРСР М. С. Хрущов від імені Радянського уряду вніс на розгляд Організації Об'єднаних Націй пропозицію про загальне і повне роззброєння. Суть цієї пропозиції полягає в тому, щоб у найбільш стислі строки, приблизно протягом 4-х років, здійснити загальне і повне роззброєння держав.

Це означає, що повинні бути розпущені всі збройні сили, ліквідовані всі озброєння, припинене воєнне виробництво, остаточно і назавжди заборонена і знищена ядерна, хімічна, бактеріологічна і ракетна зброя.

У жовтні 1959 р. Верховна Рада СРСР звернулася до всіх парламентів світу з закликом до загального і повного роззброєння. Пропозиція Радянського Союзу зустріла великий позитивний відгук у всіх країнах світу.

Опір роззброєнню чинять тільки ті кола капіталістичних країн, які на перший план ставлять свої корисливі цілі, яким чужі інтереси і прагнення народів.

Немає ніякого сумніву, що настане день, коли громадська думка народів примусить замовкнути маніяків атомного безумства. Загроза жахів атомної війни, небезпека шкідливих випромінювань, викликаних випробувальними ядерними вибухами, відійдуть у минуле.

Проте це зовсім не значить, що людство відмовиться від моці термоядерної енергії. Її сонячну могутність люди примусять служити справі творення.

МАЙБУТНЄ ЕНЕРГЕТИКИ

В економічному житті людського суспільства величезну роль відіграє енергія. Здавна її головним джерелом було органічне паливо земних надр — вугілля, нафта, торф. Однак за століття люди витратили значну частину викопного пального. Сьогодні становище склалось дуже серйозно: якщо вугілля і нафту і далі спалюватимуть так само марнотратно, як тепер, то всього через кілька десятиріч над людством нависне загроза гострого енергетичного голоду. Правда, ще немало рік чекає свого підкорення, ще треба буде в широких масштабах освоїти променисті потоки Сонця, силу припливів, морського прибою, тепло земних надр. Але багато які з цих джерел труднодоступні для техніки. Недаром найбільша частина світової енергетики розвивалась і розвивається, базу-

ючись саме на паливі. Як же врятувати його від занадто швидкого знищення? Чим замінити його?

В останні роки починає переможний похід енергетичне застосування ядерного пального — урану і торію. В ряді країн збудовано і будуються атомні електростанції. Це, безперечно, відсуне загрозу недостачі енергії. Проте треба пам'ятати, що урану і торію в земній корі не так уже й багато. Якщо всю світову енергетику перевести на таке «розщепне» ядерне пальне, то при нинішніх темпах зростання споживання енергії його вистачить тільки на 100—200 років. За цей же період будуть винищені запаси вугілля і нафти.

Що ж, виходить, енергетичний голод неминучий? Ні! Ніколи на Землі не буде недостачі палива. Можна без всяких побоювань будувати нові електростанції на вугіллі, нафті, газі, нарощувати міць теплової енергетики. Для майбутніх століть наука бачить вихід. І серед багатьох шляхів мирне освоєння енергії ядерного синтезу, приборкання водневої бомби — один з найбільш перспективних. Саме це має влити життя у могутню техніку майбутнього.

У травні 1955 р. президент Академії наук СРСР А. Н. Несмєянов виголосив знаменні слова: «Настав час замість використання жалюгідних крихт консервованої в тому чи іншому вигляді на нашій планеті колосальної енергії Сонця створити своє сонце на Землі. А правда ж, це звучить як фантазія? Але хіба фантазія — електростанції, що використовують ядерну енергію поділу урану; двигуни на атомному пальному? Ще ближче ми підійдемо до мети, коли зуміємо добути керовану реакцію, подібну до реакцій, що відбуваються на Сонці. Тоді ми справді створимо наше сонце на Землі».

З високої трибуни XX з'їзду КПРС акад. І. В. Курчатов говорив про проблему штучного сонця як про конкретну дослідну мету. «Теоретичні роботи з атомної і ядерної фізики, — відзначив тоді радянський вчений, — відкрили можливості шукати новий шлях використання атомної енергії в мирних цілях, відкрили можливість експериментального розгортання робіт по здійсненню керованих термоядерних реакцій — реакцій синтезу, або злиття, що є найважливішим, генеральним завданням науки».

На позачерговому XXI з'їзді КПРС завданню оволодіння керованим термоядерним синтезом було присвячено майже ввесь виступ І. В. Курчатова.

СУТЬ ПРОБЛЕМИ

Суть проблеми, яку А. Н. Несмєянов назвав якось «грандіозною щодо трудності і грандіозною щодо сподіваного результату», зрозуміла. Нам треба буде навчитися викликати термоядерні процеси без допомоги атомної або якоїсь іншої бомби — в невеликих, безпечних масштабах. Величезна енергія, яка при цьому виділяється, тоді стане доступною контролю, регулюванню і, отже, технічному освоєнню. Досягти такої мети — значить назавжди позбавити людство від загрози нестачі енергії, бо запаси речовин, доступних ядерному синтезу, — ізотопів водню — на Землі величезні.

Між ядрами ізотопів підуть такі реакції:

$$D_1^2 + T_1^3 \rightarrow n_0^1 + He_2^4,$$
$$D_1^2 + D_1^2 \rightarrow n_0^1 + He_2^3,$$
$$D_1^2 + D_1^2 \rightarrow H_1^1 + T_1^3.$$

Крім того, вступлять у взаємодію синтезовані ядра легкого гелію, тритію, водню.

Фізикам, що взялися за розв'язання грандіозного завдання мирного термоядерного синтезу, зразу ж стали ясними основні умови його успішного розв'язання.

У реакторі ядерного синтезу термоядерне пальне не можна використати ні в твердому, ні в рідкому стані. Придатний тільки газ, причому надзвичайно розріджений, що перебуває під дуже незначним тиском. В такому стані речовина при нагріванні висилає менше променистої енергії і її значно легше розжарити. Це дуже важливо, бо нагрівання треба вести до дуже високих температур. Як показали теоретичні розрахунки, в суміші рівних частин важкого і надважкого водню самопідтримний процес ланцюгового термоядерного синтезу розгориться при 50 млн., а в чистому дейтерії при 300—400 млн. градусів. Найвигідніші («оптимальні») температури цих реакцій відповідно становлять 150 і 500 млн. градусів (і то при умові, що «пальне» надійно затримане в якійсь «камері згоряння» і не «витікає» звідти).

Ні в якій твердій посудині неможливо так сильно розігріти речовину. У такій посудині неможливо і вдержати її в нагрітому стані. Проте наука вже досить давно нащупала вихід з цього, здавалось би, безвихідного тупика. Єдина можливість — застосувати для удержання і теплової ізоляції плазми «посудину» з магнітного поля. На цю можливість указали

у 1950 р. радянські академіки І. Є. Тамм і А. Д. Сахаров.

Справа в тому, що речовина, розжарена до температур в сотні тисяч і мільйони градусів, уже не може складатися із звичайних нейтральних атомів. При таких високих температурах атоми налітають один на одного з такою силою, що не можуть лишитися цілими. Вони вщент розбиваються, поділяються на дрібніші частини — атомні ядра і електрони, з яких вони складаються. А ці «осколки» атомів, як відомо читачеві, зовсім не нейтральні. Вони мають електричні заряди: електрони—негативний, а атомні ядра — позитивний.

Суміш цих частинок, уже згадана нами плазма, являє собою дуже своєрідний стан речовини. Вона мало схожа на свого холодного собрата — газ. І основна особливість плазми полягає в тому, що вона легко піддається впливу зовнішніх електричних і магнітних полів.

Уявіть собі, наприклад, що рухомі електрично заряджені частинки плазми потрапляють у постійне магнітне поле. Як тільки це станеться, шляхи частинок зараз же зміняться — з прямих вони стануть викривленими, перетворяться у відрізки спіралей і кіл. І чим сильніше буде магнітне поле, тим крутіше викривляться шляхи частинок плазми. Якщо зовнішнє магнітне поле досить сильне, то воно може зовсім не пропустити крізь себе рухомі електрично заряджені частинки. Кожна з них, звідки б вона не летіла, потрапивши в таке поле, завертатиме назад. Ось чому магнітне поле може стати для плазми надійною перешкодою, свого роду непрохідною «стіною». І фізики придумали немало різних способів створення таких магнітних «стін» з метою розігрівання і теплової ізоляції плазми.

Які ж ці способи?

ПРЯМІ ТРУБКИ

У 1956 р. побачили світ підсумки широких радянських досліджень розжареної плазми в прямих розрядних трубках. Експерименти були проведені в Інституті атомної енергії Академії наук СРСР під керівництвом академіків Л. А. Арцимовича і М. А. Леонтовича. Ці роботи, відзначені в 1958 р. Ленінською премією, увінчались блискучим успіхом. Газоподібні ізотопи водню в лабораторних умовах з допомогою сильних електричних розрядів удалось розігріти до мільйона градусів.

Як було здобуто цю першу вершину в поході науки за безпечну «термоядерну запальничку»?

Уявіть собі закриту циліндричну трубку з фарфору або скла. З обох кінців в неї ввели металеві електроди, саму трубку звільнили від повітря і потім наповнили її розрідженим дейтерієм. Коли експеримент було підготовлено, електроди сполучили з батареєю конденсаторів, зарядженою до 20—50 тис. *в*. І в ту ж мить на атоми газу обрушилось потужне електричне поле. Воно вщент розбило атоми, зірвало з них електрони. У трубці виникла плазма, речовина, що складається, повторюємо, з осколків атомів — «голих» атомних ядер і електронів.

Процес наростав лавиною. Дедалі більше атомів розбивалося, все більше виникало ядер і електронів. Блискавично розвивався плазмовий розряд.

Плазма, на відміну від звичайного газу,— чудовий провідник. Тому через неї відразу ж почав іти колосальної величини (до мільйона амперів) електричний струм. Уже це одно викликало щонайсильніше розігрівання плазми, але підвищення її температури було зв'язане і з іншим явищем.

З шкільних фізичних дослідів читачеві відоме просте явище: якщо по якомусь провіднику проходить електричний струм, то навколо нього неодмінно виникає магнітне поле: стрілка компаса, піднесеного до такого провідника, помітно відхиляється. Так буває завжди — який завгодно струм обов'язково викликає магнітне поле. Не є винятком, звичайно, і струм плазмового розряду. Він теж породжує власне магнітне поле.

Але плазмовий струм у нашій розрядній трубці надзвичайно великий. Отже, наведене магнітне поле досить значне. Його силові лінії наче охоплюють плазмовий струмок еластичними кільцями. Частинки плазми, потрапивши під владу цього поля, відхиляються від свого прямолінійного шляху і дуже швидко — з швидкістю кур'єрського поїзда, летять до осі трубки, до центральних областей потоку плазми.

Словом, потік плазми під впливом власного магнітного поля різко стискається, стягується в тоненький шнурок. Відбувається явище, яке фізики називають «пінч-ефектом». Причому під час стягування виникає неймовірна штовханина частинок, які рухаються і налітають одна на одну. Поблизу осі шнура вона особливо велика. І саме завдяки цьому наростаючому хаосу зіткнень у шнурі відбувається дальше величезне підвищення температури, приблизно до мільйона градусів.

Отже, магнітне поле, що виникло навколо плазмового потоку, не тільки здавило плазму. Воно відіграло ще одну важливу роль: стало своєрідною теплоізоляційною стіною — невидимою панчохою, яка наче заперла всередині плазми її внутрішню енергію, ізолювала її від навколишнього холодного газу і стінок трубки, не дала їй зразу ж піти на стінки трубки, розсіятися.

Згодом радянські фізики вдосконалили розрядні пристрої, підсилили наростання струму у трубці і добились розігрівання плазми до температур в 3—4 млн. градусів.

Правда, в прямих розрядних трубках висока температура створюється тільки на дуже незначну мить, що вимірюється мільйонними частинами секунди. Зоряне нагрівання в таких пристроях збуджується ніби дуже різким і короткочасним ударом.

Підраховано, що для ефективного звільнення термоядерної енергії треба, щоб цей удар мав силу вибуху десяти тонн толу. Плазма ж, «зайнявшись» від такого впливу, віддала б свою енергію синтезу ще міцнішим вибухом. Тому в наші дні вчені прийшли до висновку, що розряди в прямих трубках можуть мати тільки дослідне значення.

Для практики, для муйбутніх термоядерних реакторів треба шукати спокійнішу «запальничку», в якій плазма «займалася» б обережним, поступовим, повільним способом. Тільки при цій умові енергія термоядерного синтезу стане доступною для технічного освоєння.

БЕЗ ЕЛЕКТРОДІВ

Короткий строк життя плазми — невід'ємна особливість процесів у прямих трубках. Заряджені частинки там моментально прямують до електродів і виходять з розряду. Крім того, з електродів у плазму потрапляють важкі атоми, які забруднюють її і дуже знижують її температуру.

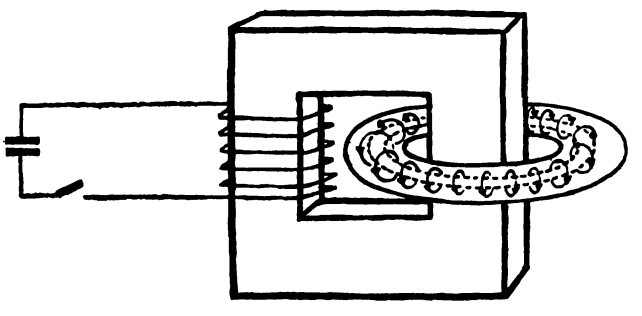


Рис. 3. Спрощена принципіальна схема тороїдальної камери з залізним сердечником для збудження кільцевих плазмових розрядів.

А чи не можна здійснити плазмовий розряд без електродів? Виявляється, можна.

Читачеві, мабуть, відомий найпростіший електротехнічний пристрій — трансформатор. Його можна побачити в кожному радіоприймачі. І кожний знає, що первинна обмотка трансформатора, на яку подається перетворюваний змінний струм, не має ніякого контакту з вторинною обмоткою, звідки знімається перетворений струм. Змінний струм первинної обмотки створює змінне магнітне поле в залізному сердечнику. А воно в свою чергу наводить змінний струм у вторинній обмотці, намотаній на той самий залізний сердечник, що і первинна.

І от виникла ідея — спробувати зробити «термоядерну запальничку» у вигляді трансформатора, в якому роль вторинної обмотки відігравало б кільце плазми. Уявіть собі (рис. 3) замкнуту круглу трубу у формі бублика — т о р. В такій камері знаходиться дуже розріджений газ. По поверхні цей бублик обвитий первинною обмоткою. Тороїдальну камеру можна зробити як з залізним сердечником, так і без нього.

Як же діє установка? Від батареї конденсаторів на первинну обмотку подається електричний імпульс дуже високої напруги, який наводить сильний струм у «витку» газу, що знаходиться в торі.

Плазмовий струм проходить там, не натрапляючи ні на які електроди. Тому є надія добути багато більш довговічний розряд, ніж у прямих трубках, забезпечити завдяки цьому плавніше наростання сили розрядного струму, спокійніший режим підняття температури.

На жаль, практичне здійснення кільцевих плазмових розрядів натрапило на серйозні труднощі. Шнур плазми — дуже капризне дітище фізичного експерименту. В тороїдальних камерах, де йому треба жити порівняно довго, це особливо небезпечно. Будь-яке випадкове потовщення шнура, навіть зовсім незначне, вмить роздувається, викликає пульсацію і виводить плазму з рівноваги. Згубно впливають і зовсім незначні зменшення товщини шнура.

Як же зробити плазмовий потік стійкішим, міцнішим? Фізики вирішили «протягти» вздовж шнура плазми укріплюючі «нитки», роль яких доручили відіграти силовим лініям додаткового зовнішнього магнітного поля, спрямованого вздовж плазмового струму. Створити таке

поле неважко: досить намотати на розрядну трубку ще одну дротяну котушку і пропустити через неї постійний струм. Силові лінії зовнішнього магнітного поля зміцнюють струмочок плазми, роблять його пружним і еластичним.

Правда, одне це не врятує розряд від раптового руйнування. Струмок плазми лишається не застрахованим від довгих викривлень, коли, лишаючись однорідним у товщину, він враз зігнеться положистою дугою, торкнеться холодної стінки камери і загине.

Проте фізики знайшли засіб, який уберігає в якійсь мірі і від такої неприємності. Розрядну трубку вони запропонували робити не з скла або фарфору, а з товстого шару металу. Метал — це свого роду гальмо для магнітного поля. Проникаючи в металеву стінку, магнітне поле плазмового струмка переборює опір відповідних магнітних сил, які збуджуються вихровими рухами електронів металу, «під натиском» поля-пришельця. Метал діє подібно до ресори, яка стискає шнур звідусіль і не дає йому ударитися об стінку.

Обидва способи зміцнення розряду — додаткове зовнішнє поле і металеві стінки — застосовуються в сучасних тороїдальних камерах.

КАМЕРИ-БУБЛИКИ

Прикладами таких камер можуть бути велика установка «Зета» в Харуеллі (Англія), радянські установки Інституту атомної енергії Академії наук СРСР і «Альфа».

Правда, надії, які покладала теорія на «камери-бублики», ще далеко не здійснились. Температура кільцевих розрядів поки що багато нижча, ніж прямих.

Що ж спостерігається в експериментах з камерами-бубликами?

Під час експериментів з тороїдальними камерами фізики звернули увагу на те, що розжарена при кільцевому розряді плазма випромінює нейтрони. Явище це привернуло особливу увагу вчених, бо саме нейтрони можуть бути вісниками того, що почалась термоядерна реакція злиття ядер важкого водню в ядра легкого гелію. Один нейтрон при кожній такій реакції виявляється «зайвим» і стає вільним. А через те що нейтрони не мають електричного заряду, вони вільно пролітають крізь магнітне поле, що оточує плазму, і можуть бути зареєстровані спеціальними приладами. Проте треба сказати, що нейтронне випромінювання було зареєстроване і в дослідах з прямими трубками, зокрема в радянських експериментах 1952 р., про які ви прочитали вище. Проте тоді ядра важкого водню синтезувались, випускаючи нейтрони не через високу температуру плазми, а з інших причин. То не були, так би мовити, «термоядерні» нейтрони.

У тороїдальних камерах наявність нейтронного випромінювання теж не свідчить ще про те, що почався термоядерний процес. Взагалі, незважаючи на те, що кільцеві розряди тривають у тисячі раз довше, ніж прямі, вони бувають поки що дуже нестійкими, швидко руйнуються. Фізикам треба ще багато попрацювати, щоб добитися стійкості плазмових потоків у камерах-бубликах.

МАГНІТНА ПАСТКА

Ми знайомі вже з двома способами нагрівання плазми до високої температури — в прямих розрядних трубках і в тороїдальних камерах. В обох випадках використовується потужний електричний розряд. Під впливом зовнішнього електричного поля частинки плазми мчать з великою швидкістю і саме завдяки цьому породжують власне магнітне поле, яке стискає потік плазми і підвищує його температуру. Однак власне магнітне поле плазмового розряду все ж не дуже велике. Дуже нелегко примусити його досить сильно розігріти плазму і захистити її від втрати тепла, від руйнування.

І вчені прийшли до думки спробувати відмовитися від застосування електричних розрядів, позбавитися від послуг власного магнітного поля плазмових потоків. Було поставлено мету: заздалегідь заготувати міцний магнітний «мішок», впустити в нього плазму, а потім якимсь способом спокійно і плавно підняти її температуру. В нашій країні цю ідею висловив у 1953 р. член-кореспондент Академії наук СРСР Г. І. Будкер. Пристрої, які він запропонував, дістали назву магнітних пасток.

Який же принцип цих пристроїв?

Ми вже знаємо, що в постійному магнітному полі електрично заряджені частинки відхиляються від прямолінійного шляху і починають рухатися по колу. І якщо, скажімо, впустити заряджену частинку в постійне магнітне поле, а потім різко підсилити його, то коловий шлях, по якому рухається частинка, стиснеться, радіус кола значно зменшиться. Частинка буде наче захоплена магнітним полем (рис. 4). Те саме станеться, якщо не підсилювати поле, а

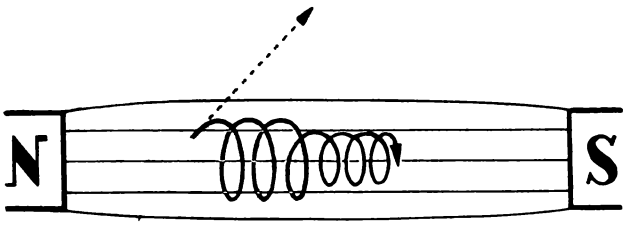


Рис. 4. Магнітне поле викривляє шляхи електрично заряджених частинок, змушуючи їх рухатися по колах або спіралях. Підсилення поля веде до збільшення кривини шляху частинок.

якимсь способом роздробити пущену в нього заряджену частинку на осколки, які теж мають електричний заряд. Осколки, як легші, ніж сама частинка, будуть сильніше завертатися магнітним полем і не зможуть відразу вибратися назовні. На цих принципах і діють магнітні пастки.

Найпростіша магнітна пастка — це камера, в якій постійним струмом, що проходить по зовнішніх обмотках, створено циліндричне магнітне поле, різко підсилене на кінцях. Силові лінії поля розміщаються там приблизно так само, як волокна цибулини. Області підсиленого поля називаються звичайно «пробками».

Плазма впорскується в пастку з якогось джерела, а потім її частинки захоплюються у магнітний полон (або підсиленням поля, або дисоціацією, роздробленням заряджених частинок на дрібніші). Піймана плазма на деякий час затримується в магнітній пастці. Рух частинок, що відбиваються від стінок і від «пробок», швидко стає зовсім безладним, тим самим енергія впорснутого потоку перетворюється в тепло.

Правда, такі пробки не дуже надійно закупорюють пастку. Багато частинок через ці пробки виходить назовні. Тому для збудження незатухаючої термоядерної реакції в такому пристрої потрібні багато вищі температури, ніж у «наглухо» запертій плазмі. Звідси висновок: треба старатися міцніше «запертн» пастку. Фізики пропонують для цього підсилити запірну дію пробок — областей підсиленого магнітного поля — високочастотними електромагнітними полями.

Коли плазму піймано в пастку, можна сподіватися розігріти її ще сильніше, якщо, скажімо, ввести в пастку магнітний «поршень» — просунути всередину одну з пробок. Плазма при цьому стиснеться, і температура її різко підвищиться за тим самим законом, за яким нагрівається повітря, стискуване під поршнем дизельного двигуна. Тільки тут поршень і циліндр будуть зроблені з невидимого і невідчутного матеріалу — магнітного поля.

«ОГРА»

Влітку 1958 р. в Інституті атомної енергії закінчилось будування найбільшої магнітної пастки, що дістала назву «Огра» (рис. 5). Наукове керівництво її створенням належить

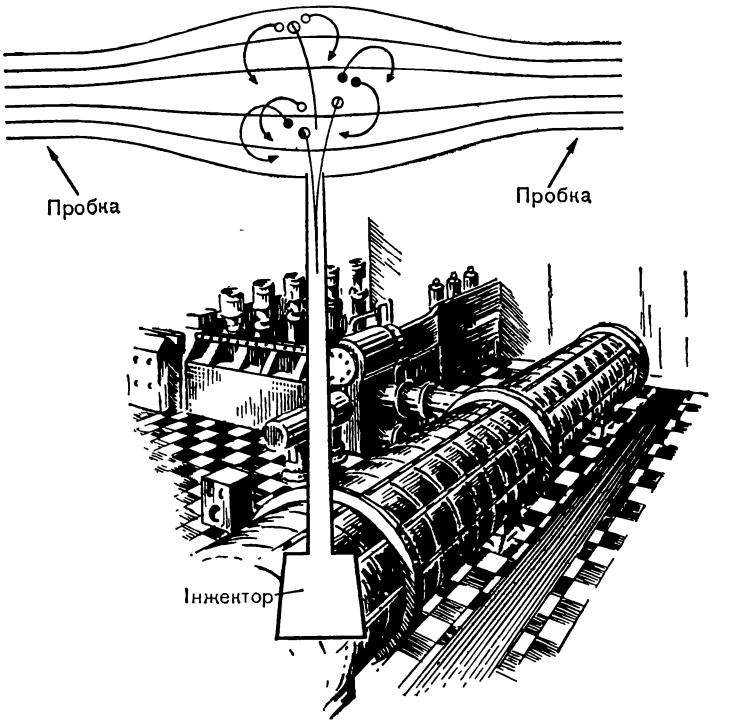
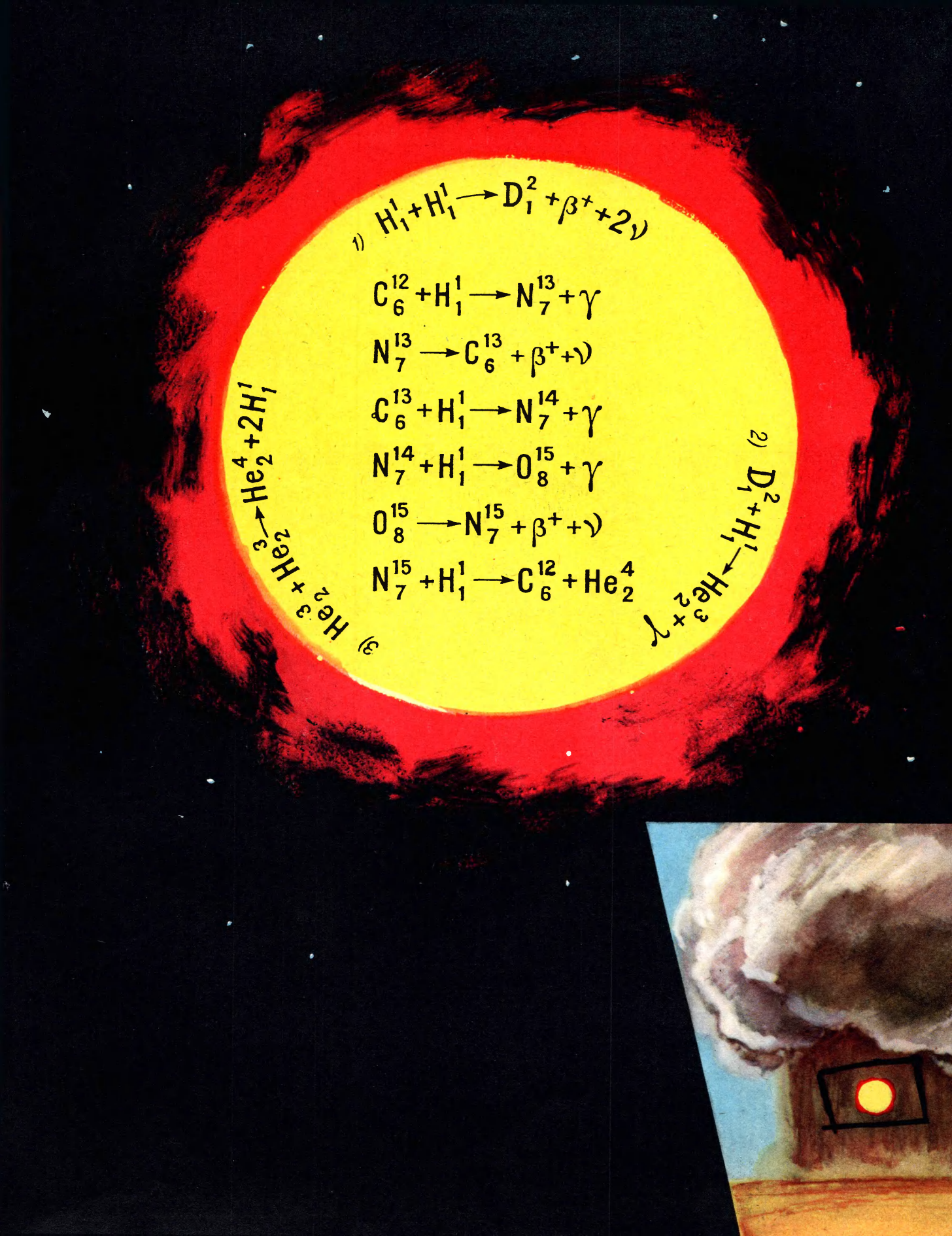
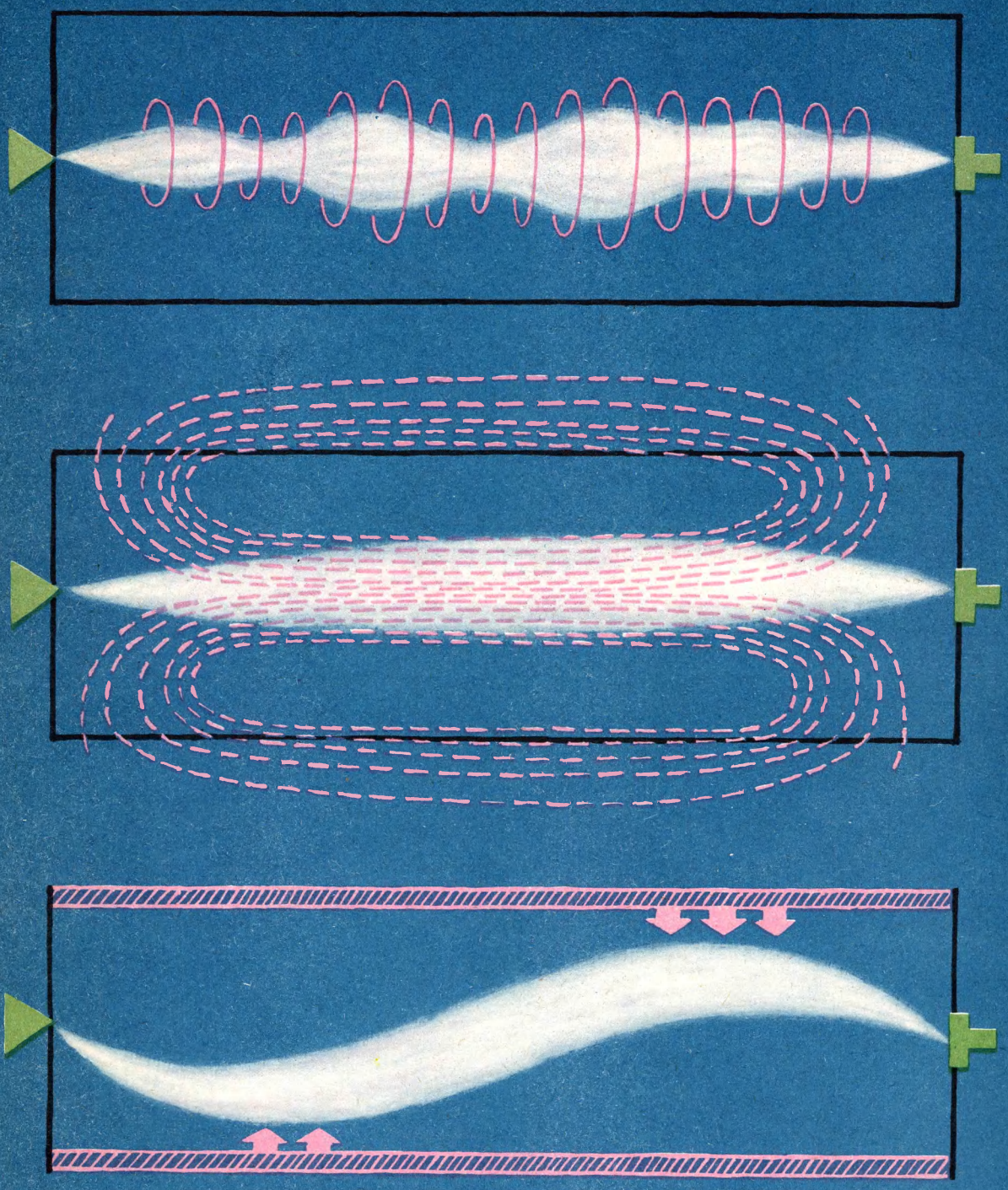


Рис. 5. Спрощена схема дії установки «Огра».

Таблиця 31. Ядерні реакції, що відбуваються в надрах Сонця. По колу написано реакції протонно-протонного циклу, посередині — реакції вуглецевого циклу. Саме при цих реакціях звільняється велетенська сонячна енергія. Вибух водневої бомби — це миттьовий спалах ядерного синтезу, подібний до тих, що відбуваються в сонячних глибинах.


1) $H_1^1 + H_1^1 \rightarrow D_1^2 + \beta^+ + 2\nu$
$C_6^{12} + H_1^1 \rightarrow N_7^{13} + \gamma$
$N_7^{13} \rightarrow C_6^{13} + \beta^+ + \nu$
$C_6^{13} + H_1^1 \rightarrow N_7^{14} + \gamma$
$N_7^{14} + H_1^1 \rightarrow O_8^{15} + \gamma$
$O_8^{15} \rightarrow N_7^{15} + \beta^+ + \nu$
$N_7^{15} + H_1^1 \rightarrow C_6^{12} + He_2^4$
2) $D_1^2 + H_1^1 \rightarrow He_2^3 + \gamma$
3) $He_2^3 + He_2^3 \rightarrow He_2^4 + 2H_1^1$



до 400000000°!

лауреатові Ленінської премії І. Н. Головіну, а в будуванні установки брало участь кілька колективів інженерів і вчених.

«Огра» належить до велетнів експериментальної ядерної фізики, які в наші дні стали необхідним знаряддям в руках дослідників. Досить сказати, що максимальна енергія, споживана установкою, досягає 4 тис. *квт*. Ціла енергопідстанція обслуговує цей «прилад».

Камера «Огри» — це велика (завдовжки 14 *м* і з внутрішнім діаметром 1,5 *м*) труба, в якій спеціальними насосами створюється щонайглибший вакуум — тиск, менший від мільйонної частини атмосферного. Циліндричне, підсилене на кінцях магнітне поле створюється зовнішніми обмотками. Під час експерименту в цю пастку впорскують із спеціального інжектора дуже прискорені іони молекул водню. В пастці вони зазнають різних зіткнень і тому розколюються на дрібніші атомні осколки, що, як ми вже відзначали, спричиняється до того, що ці частинки захоплюються в магнітний полон. Енергія впорснутого потоку і частинки його виявляються затриманими в пастці. Підраховано, що таким способом можна сподіватися добути температуру в мільярд градусів. Правда, внаслідок «витікання» плазми крізь пробки цього мільярда ледве вистачить на збудження самопідтримного термоядерного синтезу в суміші дейтерію в тритієм. А щоб «зайнявся» чистий дейтерій, цього мало.

Повідомлялось, що на «Огрі» після налагодження передбачається провести широкий комплекс досліджень. Мають всебічно перевірити попередні положення, які передбачають немало «підводних каменів». Розв'язання проблеми керованого термоядерного синтезу ввійшло тепер у таку фазу, коли дальший рух вперед вимагає надзвичайно важких дослідів, дуже складних експериментальних установок.

СПІВДРУЖНІСТЬ УЧЕНИХ

Сьогодні ми не можемо передбачити, якою «запальничкою» буде підпалена перша промислова термоядерна реакція. Наукова розвідка не знайшла поки що напряму головного удару. В наступних дослідженнях фізики всебічно вивчать багато можливостей. Про деякі з них ми розповіли. Але є і інші ідеї.

Цікаві, наприклад, експерименти з камерами, скрученими подібно до вісімки, які розробив видатний вчений США Л. Спітцер. Немало надій покладається на овальні камери, всередині яких створюється своєрідне гофроване магнітне поле. Багато пропозицій висловлюється для зміцнення плазмових утворів, для боротьби з їх нестійкістю. Удосконалюються методи дослідження гарячої плазми, визначення її форми, температури, тиску. Виникла навіть нова наука — діагностика плазми, яка вивчає цю незвичайну речовину найрізноманітнішими способами, аж до астрофізичних.

Проте не тільки фізики зайняті приборканням термоядерної реакції. Багато справ у металургів, хіміків, спеціалістів з радіоелектроніки. Як відзначав І. В. Курчатов, термоядерні реактори не можна створити без справжньої революції у вакуумній техніці. Треба буде навчитися добувати у великих об'ємах в тисячі і десятки тисяч раз глибше розрідження, ніж це вдається робити зараз. Потрібні будуть метали небувалої чистоти, для виплавки яких треба розробити і освоїти нові металургійні процеси. Необхідні електроізоляційні матеріали високої міцності, які до того ж можуть витримувати інтенсивне опромінювання нейтронами. Потрібні, нарешті, потужні високочастотні електрогенератори — прилади для комутації сильних струмів при високій напрузі.

На розв'язання всіх цих завдань спрямована праця багатьох колективів радянських учених та інженерів-практиків.

У недалекому минулому всі дослідження керованого ядерного синтезу були суворо засекречені. Вважалось, що коли вдасться побудувати термоядерний реактор, то він послужить не тільки джерелом енергії, але і установкою для добування ядерної вибухівки (з допомогою нейтронного випромінювання реактора). Але наша країна виступила ініціатором розсекречування цих досліджень. Навесні 1956 р. з дозволу уряду СРСР І. В. Курчатов під час перебування в Англії зробив перед фізиками атомного центра в Харуеллі доповідь про радянські роботи. І лід недовір'я було в якійсь мірі зламано. Незабаром Англія і США

Таблиця 32. Магнітні поля, які зміцнюють плазмовий розряд. Вгорі — власне магнітне поле розряду. Посередині — додаткове магнітне поле, утворене постійним струмом, що проходить по обмотці, зробленій навкруг розрядної трубки. Внизу показано дію металевих стінок розрядної трубки, які відштовхують шнур плазми.

опублікували результати своїх досліджень. Друга Женевська конференція в справах мирного використання атомної енергії, що відбулася восени 1958 р., вилилась у пожвавлене обговорення ученими різних країн цієї животрепетної проблеми. Після конференції відбулись взаємні відвідання фізиками радянських і зарубіжних інститутів. Люди науки одностайно відзначили велику користь цього благородного співробітництва.

Усіх, звичайно, цікавлять строки остаточного розв'язання цієї проблеми. Дехто з фізиків пробував робити такі припущення. Називались цифри: 10, 20, 50 років. Проте обгрунтовані прогнози поки що навряд чи можливі.

«Я не беру на себе сміливість робити передбачення про строки освоєння керованої термоядерної реакції, — говорив І. В. Курчатов на позачерговому XXI з'їзді КПРС, — але я хочу завірити делегатів з'їзду, що радянські вчені, інженери і техніки, що працюють над завданнями термоядерної енергетики, зроблять усе, що від них залежить, для розв'язання цієї найважливішої науково-технічної проблеми».

ДО ТЕРМОЯДЕРНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Спробуємо уявити собі, який вигляд матиме термоядерна енергетична установка майбутнього.

Насамперед застережемо читача від мрій про щось схоже на справжнє Сонце. Штучні світила у вигляді супутників, що ширяють у небі, мабуть, не зійдуть з сторінок фантастичних романів.

Первенець термоядерної енергетики буде, мабуть, скромною на вигляд електростанцією, може зовні подібною до прославленої АЕС під Москвою, яка влітку 1954 р. відкрила еру ядерної енергетики.

У термоядерному «котлі» при температурі у багато мільйонів градусів «горітиме» суміш важкого і надважкого водню. Гаряча зона такого реактора (розміром не менше метра) випромінюватиме сильний потік променистої енергії. А втім, кількість випромінювання, незважаючи на надвисоку температуру, не буде катастрофічно величезною. Завдяки зовсім не значній густині плазми ця кількість буде приблизно такою, як у твердого тіла, розжареного до 5000°. Та й не світитиме цей реактор занадто сильно: променистий потік виллється головним чином у вигляді невидимих ультрафіолетових і рентгенових променів. Випромінюватиметься також дуже багато нейтронів, які матимуть корисне застосування. Бомбардуючи нейтронами блоки металу літію-6, розміщені навколо реактора, можна буде добувати все нові і нові порції термоядерного пального — тритію. Так його можна буде добувати навіть більше, ніж «згорить» в термоядерному процесі. А променисте багатство тим чи іншим способом перетворюватиметься в електричний струм (за допомогою різних теплових котлів і турбін або напівпровідникових батарей).

Дуже привабливий і інший метод відведення звільненої енергії — простий і разом з тим на диво ефективний. Його запропонував у 1954 р. Г. І. Будкер. Йдеться про пряме перетворення енергії термоядерного синтезу в електричний струм. Ось суть цього методу.

У реакторі атомні ядра ізотопів водню, що набули у зоряному жарі плазми колосальних швидкостей теплового руху, налітатимуть одне на одного і зливатимуться, звільняючи велетенську енергію, яка до того в них спала. Звільнившись, ця енергія в значній мірі передасться самим же атомним ядрам, які через це рухатимуться ще швидше. Але частинки ці — електрично заряджені, а рух електричних зарядів обов'язково породжує магнітне поле. Значить, виникнення потужної самопідтримної термоядерної реакції викличе такий самий потужний спалах магнітного поля. При цьому сама плазма розшириться, охолодиться, і ланцюгова термоядерна реакція в ній загасне.

Уявімо собі тепер, що плазму взято в магнітну пастку. Ми частими імпульсами стискаємо плазму і тим самим викликаємо пульсуючу термоядерну реакцію. Тоді в такт з імпульсами з реактора вилітатиме магнітне поле, породжене термоядерним синтезом. Переборюючи тиск магнітного «мішка» пастки, воно періодично вириватиметься з об'єму реактора.

«Піймати» це поле — значить уловити термоядерну енергію. І для цього навколо реактора досить поставити дротяні обмотки. Спалахи магнітного поля, перетинаючи провідники обмоток, створять в них пульсуючий електричний струм (за тим самим законом, на якому діє всякий сучасний електрогенератор).

Роль обмоток цього термоядерного електрогенератора може, звичайно, відігравати і та сама котушка, яка створює магнітну пастку плазми. Бачите, як просто!

Цей метод, треба сподіватися, буде здійснено. Завдяки йому наше рукотворне сонце обіцяє набрати форми установки, здатної до прямого, безпосереднього перетворення енергії ядерного синтезу в електричний струм — без всяких проміжних переходів енергії, як на звичайних теплових електростанціях (рис. 6).

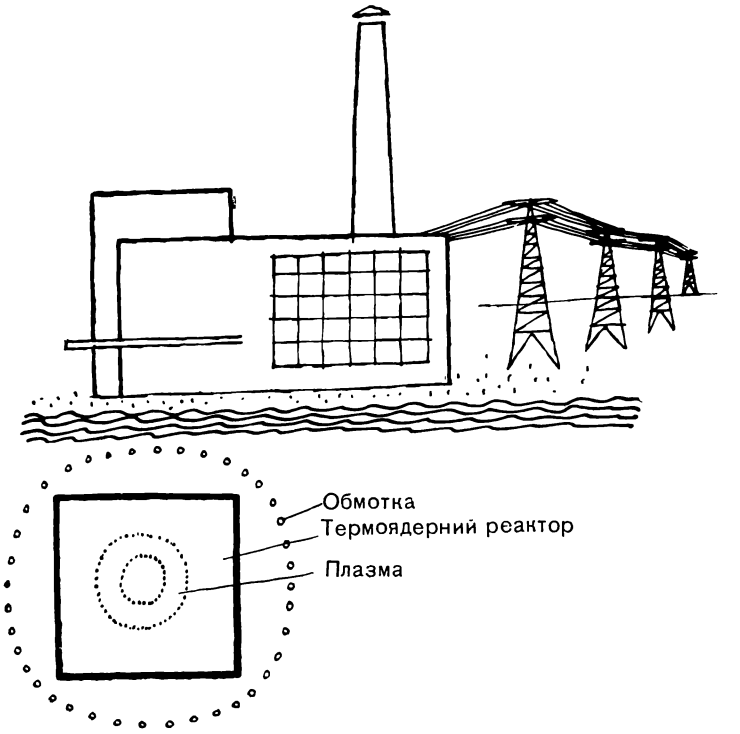


Рис. 6. Схема і можливий вовнішній вигляд електростанції з термоядерним реактором.

ВОДА — ПАЛИВО МАЙБУТНЬОГО

Природа не скривдила людей зорянним паливом. Більше того, людина користуватиметься найефективнішим термоядерним пальним — не звичайним легким воднем, а його активними ізотопами — дейтерієм і тритієм.

Надважкий водень добувають, як ми говорили, з металу літію, який, таким чином, набуває репутації найважливішої енергетичної сировини. Саме тритій дасть можливість будувати термоядерні судна, літаки, ракети. І вже тепер учені думають над проектами термоядерних двигунів. Реактори, що працюють на чистому дейтерії, мабуть, будуть більш громіздкими і тому непридатними для використання на транспортних машинах. Зате для стаціонарних енергосилових установок дейтерій буде прекрасним пальним. Адже важкого водню в розпорядженні людини дуже багато. Він є в складі звичайнісінької води. На кожні 6 тис. атомів легкого водню води припадає один атом дейтерію. І добування дейтерію навіть у наші дні не становить великих труднощів. Для цього є багато способів. Навіть сьогодні світове виробництво дейтерію цілком забезпечило б сучасну індустрію енергією, якби ми вже вміли «спалювати» важкий водень у термоядерних реакторах. А якщо порівнювати кількості енергії, які звільняються при ядерному синтезі дейтерію і при звичайному спалюванні вугілля, то доведеться зробити висновок, що нині щодо енергетичної цінності добування дейтерію обходиться дешевше, ніж видобуток вугілля.

Термоядерні електростанції на важкому водні займуть головне місце в енергетиці майбутніх віків. Важко звикнути до думки, що це будуть електростанції, для роботи яких потрібна буде тільки вода. Одна вода — і нічого більше. І станції ці добуватимуть з води справді казкову силу. Адже перетворення в гелій грама дейтерію супроводиться звільненням 100 тис. *квт-г* енергії. Важкий водень, добутий з двох склянок води, може дати стільки ж енергії, скільки спалювання 200 літрів (стандартної бочки) бензину (рис. 7).

Води на нашій планеті 1400 мільйонів мільярдів тонн. В ній міститься 25 тис. мільярдів тонн важкого водню. Цього запасу людству вистачить на сотні мільйонів років.

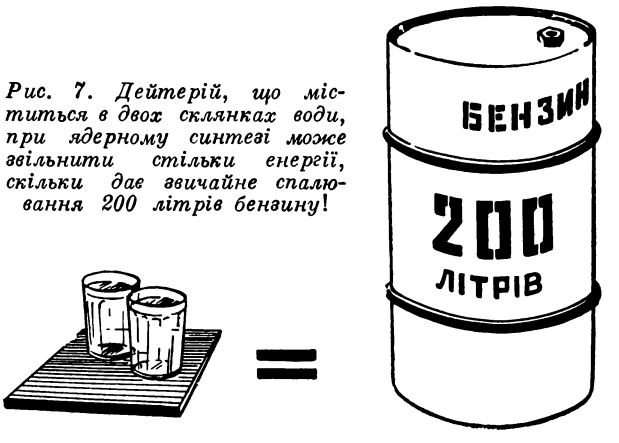


Рис. 7. Дейтерій, що міститься в двох склянках води, при ядерному синтезі може звільнити стільки енергії, скільки дає звичайне спалювання 200 літрів бензину!

З появою термоядерних електростанцій на Землі почнеться епоха небаченого енергетичного достатку. Всюди, де є вода, енергію можна буде добувати у зовсім не обмежених кількостях. Відпаде потреба перевозити паливо, передавати електричний струм на далекі відстані. Вугілля, нафта, торф цілком перейдуть у відання хіміків, почнеться розквіт могутньої техніки металургії, машинобудування. Володіючи енергією, наші потомки стануть повновладними господарями природи. Навіть клімат підкориться людині. Справді безмежні можливості чекають індустрію майбутнього, індустрію комунізму.

Довідковий відділ

Що читати з фізики

Орлов В., О смелой мысли, М., Детгиз, 1954, 167 стор. (Шкільна бібліотека).

Друга частина книги — «Велике в малому» — містить у собі ряд нарисів про деякі фізичні явища та їх роль у житті людини.

Перельман Я. И., Занимательная физика. Парадоксы, головоломки, задачи, замысловатые вопросы и рассказы из области физики. В двух книгах, М.—Л., Гостехиздат, 1949. Книга перша— 268 стор., книга друга — 288 стор.

Писаржевский О., Навстречу великой мечте, М., Детгиз, 1959, 64 стор. (Подорож у семирічку).

У брошурі розповідається про роль науки у виконанні семирічного плану.

Соколова Е. Н., Юному физику, М., Учпедгиз, 1956, 256 стор.

Приклади, запитання, задачі, довідкові відомості, опис найпростіших саморобних приладів з механіки, молекулярної будови речовини, мір і вимірювань.

МЕХАНІЧНІ ЯВИЩА

Бублейников Ф. Д., О движении. Из истории механики, М., Детгиз, 1956, 212 стор. (Шкільна бібліотека).

У книзі висвітлено історію механіки від найдавніших часів до наших днів.

Добронравов Н. И., Беседа о колесе, М.—Л., Изд-во Академии наук СССР, 1951, 52 стор. (Науково-популярна серія).

Брошура про роль обертального руху в техніці.

Ивановский М., Законы движения, М., Детгиз, 1957, 128 стор. (Шкільна бібліотека).

У книзі розповідається про основні закони механіки і про історію їх відкриття.

Игнациус Г., О загадках скорости, М., Детгиз, 1959, 64 стор.

Книга розповідає про різні види руху, про принцип відносності руху і пояснює ряд явищ, зв'язаних з цим принципом.

Краснов А. И., Волчок и применение его свойств, М., Гостехиздат, 1958, 62 стор. (Науково-популярна бібліотека).

Брошура знайомить з властивостями дзиги, гіроскопічними приладами у військовій техніці й навігації, із заспокоювачем качання, проектом однорейкової залізниці.

Перельман Я. И., Занимательная механика, М.—Л., Гостехиздат, 1951, 172 стор.

Задачі, запитання, головоломки й цікаві досліди, цікаві приклади, що охоплюють основні закони й поняття механіки

ПЛАВАННЯ І ЛІТАННЯ

Артемьев И., Искусственный спутник Земли, М., Детгиз, 1958, 124 стор. (Шкільна бібліотека).

Книга знайомить з проблемою створення штучних супутників Землі, з будовою і науковим обладнанням перших радянських супутників, з майбутнім астронавтики.

Артемьев И., Первый искусственный спутник Солнца, М., Детгиз, 1959, 64 стор. (Подорож у семирічку).

Гильзин К., Путешествие к далеким мирам, М., Детгиз, 1956, 280 стор.

Книга знайомить з проблемою міжпланетних польотів, з механікою ракетного польоту і з сучасними досягненнями ракетної техніки та її майбутнім — створенням позаземних станцій, польотами на Місяць і планети.

Жабров А. А., Почему и как летает самолет, М., Гостехиздат, 1956, 56 стор. (Науково-популярна бібліотека).

Брошура знайомить з аеродинамікою, з силами, що діють на літак, з будовою і призначенням основних частин літака.

Казневский В., Аэродинамика в природе и технике, М., Учпедгиз, 1955, 127 стор. (Бібліотека школяра).

Книга знайомить з основними поняттями аеродинаміки — законами обтікання, з опором повітря, виникненням підіймальної сили, особливостями аеродинаміки великих швидкостей.

Ляпунов Б., Открытие мира, изд. 2-е, «Молодая гвардия», 1959, 208 стор.

Книга знайомить з проблемою створення штучних супутників і з міжпланетними подорожами. В ній є також розділ про дослідження верхніх шарів атмосфери за допомогою ракет.

Меркулов И. А., Искусственные спутники Земли — торжество идей К. Э. Циолковского, М., изд-во «Знание», 1958, 72 стор.

Низе Г., Игры и научные развлечения, М., Детгиз, 1958, 160 стор. (Для середньої школи).

Досліди з механіки, гідростатики, оптики, електрики та інших розділів фізики.

Путь в Космос, Материалы газеты «Правда» о трех советских искусственных спутниках Земли, М., изд-во «Правда», 1958, 320 стор.

У книзі, крім матеріалів про три радянських штучних супутники Землі, вміщено дані про радянські дослідні ракети.

Федоров Е. К., Научные исследования с помощью ракет и искусственных спутников Земли, М., изд-во «Знание», 1958, 32 стор.

БУДОВА РЕЧОВИНИ І РОБОТА ТЕПЛОВИХ МАШИН

Верещагин Л. Ф., Высокие давления в технике будущего, М., Изд-во Академии наук СССР, 1956, 36 стор. (Науково-популярна серія).

Иванов Ф. М., Вакуум, М., Гостехиздат, 1958, 56 стор. (Науково-популярна бібліотека).

Брошура про способи добування високих ступенів розрідження, про застосування вакууму в електроніці, атомній фізиці, для плавлення металів, у харчовій промисловості, для фільтрації рідин, поліпшення якості бетону.

Китайгородський А. И., Порядок и беспорядок в мире атомов, изд.2-е, М., Гостехиздат, 1956, 140 стор.

Книга про молекулярну будову речовини, про три агрегатні стани — твердий, рідкий, газоподібний; про кристалічні решітки; про процеси, що відбуваються під час обробки матеріалів.

Китайгородський А.И. и Мезенцев В.А., Атом и молекула, М., Госкультпросветиздат, 1952, 79 стор.

Брошура знайомить з будовою молекул і атомів, розповідає про молекулярно-кінетичні властивості матерії, суть хімічних і ядерних перетворень.

Коваль В., Петя, я и атомы (перевод с чешского), М., Детгиз, 1958, 72 стор. (Для молодшого і середнього віку).

Популярний виклад основних понять про будову речовини — молекули і атоми, періодичну систему елементів, про внутрішньоатомну енергію і застосування її в техніці майбутнього.

Левин М., Машина-двигатель. От водяного колеса до атомного двигателя, Л., Детгиз, 1957, 223 стор.

Книга знайомить з принципами будови різних теплових двигунів — від парової машини до реактивного двигуна.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА

Адирович Э. И., Электрический ток, М., Детгиз, 1955, 72 стор. (Шкільна бібліотека).

Брошура дає популярний виклад фізичних основ електротехніки — вчення про електричні заряди і струм,— способів добування електричного струму, будови електродвигунів і генераторів.

Анфилов Г., Что такое полупроводник, М., Детгиз, 1957, 144 стор.

У книзі пояснюються властивості напівпровідникових матеріалів, розповідається про їх добування і застосування.

Белов К. П., Что такое магнетизм?, М., Гостехиздат, 1955, 64 стор. (Науково-популярна бібліотека).

Брошура про природу магнетизму, магнітні властивості речовини та їх застосування.

Бернштейн А. С., Термоэлектричество, М., Гостехиздат, 1957, 56 стор. (Науково-популярна бібліотека).

Брошура висвітлює суть і застосування термоелектричного ефекту. В ній розповідається про застосування термопар для вимірювання температури полум'я, розплавленого металу, планет і зір, для регулювання температури, про термоелементи — генератори струму — і про перспективи їх застосування.

Гладков К., Телевидение, М., Детгиз, 1955, 271 стор. (Шкільна бібліотека).

Книга знайомить з фізичними основами передачі зображень на відстань.

Зеликович Э. С., Свет и цвет. Беседы о значении, явлениях и природе света и цвета, М., Госкультпросветиздат, 1950, 120 стор.

Кушнир Ю. М., Невидимые лучи, М., Воениздат, 1952, 87 стор. (Науково-популярна бібліотека).

Книга розповідає про природу, властивості, добування і застосування невидимих ультрафіолетових та інфрачервоних променів.

Коробко-Стефанов А., Звук за работой, М., Детгиз, 1957, 96 стор.

У книзі розповідається про природу чутних і нечутних звуків, а також про їх застосування в техніці.

Луизов А., Теребинская Н., Свет без тепла, Л., Детгиз, 1958, 88 стор. (На допомогу школяреві).

Книга розповідає про явища люмінесценції і створення ламп «денного» світла.

Мезенцев В., Воздушные призраки, М.—Л., Детгиз, 1953, 80 стор.

Пояснення ряду оптичних явищ в атмосфері — міражів, райдуги, зеленого променя, гало та інших, а також деяких явищ природи, викликаних наявністю в атмосфері електричних зарядів.

Плонский А. Ф., Пьезоэлектричество, М., Гостехиздат, 1956, 56 стор. (Науково-популярна бібліотека).

Брошура про суть і використання п'єзоелектричного ефекту для добування ультразвуку, для звукозапису, вивчення вібрацій, вимірювання тисків, прискорень і для інших цілей.

Плонский А., Как человек приручил волну, М., «Советская Россия», 1958, 224 стор.

Радіоелектроніка або розповідь про дивні відкриття: про те, як людина приручила хвилю, про нового Аладіна і його лампу, про те, як підслухали розмову зір, про сто професій «мислячої» машини і про багато іншого.

Сена Л. А., Светящиеся трубки, М., Гостехиздат, 1956, 56 стор. (Науково-популярна бібліотека).

У брошурі розповідається про особливості проходження електричного струму в газах, про природу світла, про явище люмінесценції і про застосування його в лампах «холодного» світла.

Сухорукихв. С., Микроскоп и телескоп, изд. 5-е, М., Гостехиздат, 1956, 64 стор. (Науково-популярна бібліотека).

Брошура розповідає, як збудовані мікроскоп і телескопи — лінзовий, дзеркальний і телескоп Максутова.

Теренин А. Н., Превращение энергии и света, М., изд-во «Знание», 1957, 24 стор.

Популярна брошура про природу світла і його перетворення, на яких грунтуються різноманітні застосування світла — фотоелектричний ефект, люмінесценція, вбирання світла молекулами і атомами, фотохімічні процеси.

Честнов Ф. И., Радиолокация, изд. 2-е, М., Гостехиздат, 1955, 54 стор (Науково-популярна бібліотека).

Брошура ознайомлює з основами радіолокації, будовою і застосуванням радіолокаційних установок.

ЯДЕРНА ЕНЕРГІЯ

Анфилов Г., Искусственное солнце, М., Детгиз, 1959, 240 стор. (Шкільна бібліотека).

Книга розповідає про термоядерні реакції і перспективи їх практичного застосування.

Гладков К., Энергия атома, М., Детгиз, 1958, 400 стор. (Шкільна бібліотека).

Історія відкриття ядерної енергії, будова і застосування ядерних реакторів, нові дані про будову речовини, перспективи застосування атомної енергії в металургії, на транспорті, для міжпланетних сполучень, для добування електричного струму.

Лешковцев В., Атомная энергия, М., Гостехиздат, 1955, 64 стор. (Науково-популярна бібліотека).

Брошура про будову атома і атомного ядра, ядерні реакції, про шляхи добування і використання атомної енергії.

Масевич А. Г., История Солнца, «Молодая гвардия», 1955, 184 стор.

У розділі «Що відбувається в надрах Сонця» (стор. 120—143) розповідається про джерела енергії зір, про термоядерні реакції в природі.

Смагин Б., Голубое свечение, М., Детгиз, 1959, 32 стор.

Брошура про відкриття і розроблення лауреатами Нобелівської премії П. О. Черенковим, І. Є. Таммом і І. М. Франком світіння, яке має важливе значення для розвитку фізичної науки.

ВИДАТНІ ВЧЕНІ-ФІЗИКИ

Анцелиович Е. С., Галилео Галилей, Учпедгиз, 1955.

Анцелиович Е. С., Леонардо да Винчи, Учпедгиз, 1955.

Аренберг А. Г., Генрих Герц, М., изд-во «Знание», 1957, 24 стор.

Болховитинов В., Александр Григорьевич Столетов (1839—1896), «Молодая гвардия», 1953, 512 стор. (Жизнь замечательных людей).

Веселовский И. Н., Архимед, Учпедгиз, 1957, 111 стор.

Дуков В М., Петр Николаевич Лебедев, М., Гостехиздат, 1951, 110 стор. (Люди русской науки).

Кассиль Л., Человек, шагнувший к звездам, «Молодая гвардия», 1958, 48 стор.

Кубис Л. П., Э. Резерфорд, Учпедгиз, 1958, 83 стор.

Кудрявцев Б. Б., Михаил Васильевич Ломоносов. Его жизнь и деятельность, изд. 2-е, М.—Л., Гостехиздат, 1950, 112 стор. (Люди русской науки).

Морозов А. А., Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765), «Молодая гвардия», 1955, 926 стор. (Жизнь замечательных людей).

Файнбойм И. Б., Эрнест Резерфорд, М., изд-во «Знание», 1958, 48 стор.

Шаховская Н. и Шик М., Майкл Фарадей. Повесть о жизни и трудах маленького переплетчика, ставшего великим ученым, М.—Л., Детгиз, 1947, 232 стор.

Покажчик імен і предметів

А

Аберація світла — видиме зміщення світила на небесній сфері, зумовлене складанням швидкості руху Землі з швидкістю світла. Хроматична А. викликається різною заломлюваністю кольорових променів. Сферична аберація відбувається внаслідок того, що промені, які паралельні оптичній осі, але знаходяться від неї на різній віддалі, фокусуються лінзою в різних точках — 435, 442

Авогадро, Амедео (1776—1856) — італійський фізик. Увів у науку поняття про молекулу. Сформулював закон, названий його ім'ям — 359

Автоматизація — застосування приладів, пристроїв і машин, що дають змогу здійснювати виробничі процеси без безпосередньої участі людини і лише під її контролем —485

Адіабатичний процес — процес, що відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем — 523

Аеродинаміка — наука про рух повітря та інших газів і про дію газів на тверді тіла, що їх вони обтікають — 293, 294

Акомодація ока—зміна фокусної віддалі кришталика ока при розгляданні різновіддалених предметів —437

Акустика — вчення про звук — 258

Акустичний тиск — надмірний тиск в шарах стискання і розрідження при поширенні пружної хвилі в газоподібному середовищі, наприклад у повітрі — 260

Альфа-частинки (α-промені) — умовна назва двічі іонізованих атомів гелію. α-промені спостерігаються при розпаді ядер деяких радіоактивних речовин; α-частинка має атомну вагу 4,003 і масу $6{,}644 \cdot 10^{-21}$ *г*. Вона несе позитивний заряд, вдвоє більший від заряду протона, і складається з двох протонів і двох нейтронів, дуже сильно зв'язаних між собою — 507, 511

Амальгама — розчин металу в ртуті — 431

Аморфний — той, що не має кристалічної будови — 365

Амплітуда — найбільше відхилення якоїсь коливної величини — 261, 273

Амфібія — земноводна тварина; по аналогії так називають тип літаків, автомобілей, танків, пристосованих для пересування по суші і воді — 285

Анаксімен (588—524 до н. е.) — грецький філософ іонійської школи — 355

Ангстрем, Андерс (1814—1874) — шведський фізик. Спеціаліст в галузі спектроскопії. Видав великий атлас спектральних ліній. Його ім'ям названо одиницю довжини: $1\ \mathring{A} = 10^{-8}$ *см* — 361

Ангстрем — одиниця довжини, що дорівнює одній стомільйонній частині сантиметра. Застосовується для вимірювання малих розмірів у мікрофізиці; позначається $\mathring{A}$ — 361

Анероїд — прилад для вимірювання тиску за допомогою порожнистої тонкостінної коробочки — 313

Анізотропія — неоднаковість властивостей у різних напрямах — 366

Анод — позитивний електрод — 456

Антинейтрон — нейтральна елементарна частинка з масою, що дорівнює масі нейтрона. Спін дорівнює 0,5, магнітний момент дорівнює 1,913. Напрям спіну і магнітного момента у антинейтрона збігаються, а у нейтрона — протилежні — 403

Антипротон — негативно заряджена частинка з масою, що дорівнює масі протона. Спін дорівнює 0,5, магнітний момент дорівнює 2,793, як і у протона, але напрямлені вони протилежно — 403

Араго, Домінік (1786—1853) — французький фізик, астроном. Запропонував ідею методу вимірювання швидкості світла, яку здійснили Фуко і Фізо. Відкрив здатність електричного струму намагнічувати залізо — 435

Арістотель (384—322 до н. е.)—один з найвидатніших мислителів стародавнього світу, учень Платона. Вплив Арістотеля на розвиток науки позначився дуже згубно за середньовіччя, коли його вчення було проголошене церквою незаперечним — 355

Архімед (близько 287—212 до н. е.) —старогрецький математик і механік. Твори А.: «Про важелі», «Книга опор», «Про кулю і циліндр», «Про спіралі», «Про плаваючі тіла», «Про вимірювання круга», «Про число піщинок» та ін.— 431

Арцимович, Лев Андрійович (нар. 1909) — радянський фізик-теоретик, академік. Найбільш відомі роботи з теорії випромінювання в електронних прискорювачах — 541

Атмосфера (технічна) — одиниця вимірювання тиску, що дорівнює тискові 1 *кГ/см*^{2} — 375

Атом — найменша частинка хімічного елементу — 502

Ахроматичні системи — спеціально підібрані оптичні системи стекол; значно зменшують хроматичну аберацію — 442

Б

Балістика — наука, що вивчає рух кинутого тіла (снаряда) в атмосфері Землі — 320

Барометр — прилад для вимірювання атмосферного тиску — 313

Бартолін, Еразм (1625—1698) — відкрив властивість подвійного променезаломлення світла в кристалах ісландського шпату — 445

Беккерель, Анрі (1852—1908) — відкрив явища природної радіоактивності (1896) — 450, 503, 524

Белл, Олександр Грейам (1847—1922) — один з винахідників телефону — 268, 269

Бета-частинки (β-промені) — умовна назва електронів, що випромінюються при розпаді ядер деяких радіоактивних речовин — 507

Биття —періодичне посилення і послаблення звуку при одночасному звучанні двох близьких тонів — 264, 265

Бінауральний ефект — властивість слухового апарату визначати напрям на джерело звуку — 264

Бойль, Роберт (1627—1691) — англійський фізик і хімік. Відкрив, незалежно від Маріотта, закон, згідно з яким добуток тиску газу на об'єм при незмінній температурі є величина стала — 259, 356

Болометр — прилад для вимірювання енергії випромінювання — 490

Бор, Нільс (нар. 1885) — відомий фізик-теоретик. Висловив основні положення сучасного уявлення про будову атома — 513

Брадлей, Джемс (Брадлі) (1693—1762) — астрономічним методом виміряв швидкість світла, використовуючи для цього аберацію — 435

Бронза — сплав міді і олова — 431

Броун, Роберт (Браун) (1773—1858) — у 1827 р. відкрив і пояснив безперервний хаотичний рух дрібних частинок, завислих у рідині — 360

В

Важка вода — різновидність води, в якій звичайний водень замінено дейтерієм або тритієм — 532

Вакуум — стан розрідження газу, що знаходиться в посудині; високий вакуум настає тоді, коли шлях частинки від одного зіткнення до іншого перевищує розмір посудини (тиск менший від 10^{-3}—10^{-4} *мм* рт. ст.). Іноді також називають вакуумом вільний від речовини простір — 237, 373, 374

Векслер Володимир Йосифович (нар. 1907) — радянський фізик, академік, один з творців синхрофазотрона — найбільшого в світі прискорювача ядерних частинок — 239, 374

Вектор — графічне зображення фізичної величини, яка характеризується числовим значенням і напрямом — 245

Вентиль — клапан для запирання потоку — 497

Висота звуку — частота звукових коливань, створюваних джерелом звуку — 262

Вібратор — прилад, який є джерелом коливань — 462

Вільсон, Чарлз Томсон Ріс (нар. 1869) — англійський фізик, винахідник камери для спостереження траєкторій елементарних частинок — 522

Г

Газодинаміка — наука, що вивчає рух газів і рідин в умовах, коли властивості стисливості мають істотне значення — 294

Галілей, Галілео (1564—1642) — великий італійський вчений — фізик і астроном. Поклав початок науковому вивченню законів руху. Відкрив закон інерції, закони коливання маятника, зробив великий вплив на весь дальший розвиток науки — 236, 439

Галс — вірьовка, що кріпить нижній кут паруса; напрям руху судна відносно вітру (правий галс — вітер дме справа) — 292

Гама (в музиці) — послідовність тонів, які входять в інтервал однієї октави (див.) — 265

Гамма-промені — умовна назва електромагнітного випромінювання з дуже короткими довжинами хвиль (від 1 ангстрема і менше), яке виникає при радіоактивному розпаді — 507

Ган, Отто (нар. 1879) — німецький фізико-хімік. Разом з Ф. Штрасманом відкрив поділ ядер урану під впливом нейтронів — 529

Гассенді, П'єр (1592—1655) — французький філософ, один з перших учених-матеріалістів — 358

Гейгер, Ганс (1882—1945) — німецький фізик. Разом з Е. Резерфордом винайшов прилад, який виявляє окремі заряджені частинки — 512, 521

Гейзенберг, Вернер (нар. 1901) — німецький фізик-теоретик, один з творців квантової механіки — 518

Гельмгольц, Герман (1821—1894) — німецький натураліст, дав математичне тлумачення закону збереження енергії, розробив багато важливих проблем фізики і фізіології — 255

Геракліт (530—470 до н. е.) — один з найвидатніших грецьких мислителів. Його слова: «Не можна два рази увійти в одну і ту саму ріку» — виражають переконання в безперервній зміні явищ у природі — 355

Геріке, Отто (1602—1686) — німецький фізик; практично довів існування атмосферного тиску (дослід з магдебурзькими півкулями) — 373

Герметичний — закритий наглухо, непроникний для повітря — 343

Герц, Генріх (1857—1894) — німецький фізик. Відкрив явище фотоефекту і вперше добув електромагнітні хвилі, теоретично передбачені Максвеллом (див.)— 428, 448, 451

Гетеродин — допоміжний радіотехнічний пристрій, що створює електричні коливання високої частоти—476

Гідравліка — наука про закони руху рідин і про способи застосування цих законів до розв'язання практичних завдань — 375

Гідролокатор — прилад, який використовує ультразвук для виявлення у воді сторонніх тіл, наприклад підводних човнів, косяків риби і т. п.— 274

Гідростатика — розділ механіки рідин (гідромеханіки), в якому вивчається стан рівноваги рідини під дією прикладених до неї сил — 280

Гіперони — нестійкі елементарні частинки з масою, більшою, ніж маса нейтрона, але меншою, ніж маса дейтона — 519

Гіпотеза — наукове припущення; фізична гіпотеза, яка пояснює яке-небудь явище, підтверджується або заперечується дослідом — 236

Гірогоризонт — прилад, що визначає положення літака відносно горизонту — 313

Гірокомпас — покажчик курсу судна, що використовує властивість дзиги —313

Гіроскоп — тіло, що швидко обертається відносно осі симетрії — 313

Глибина фокусування — відстань між предметами, які чітко зображаються на сітківці ока або на фотографічній пластинці — 437

Голос моря — інфразвук, що виникає в районі зародження шторму — 270

Горизонт — видима лінія перетину небозводу з земною поверхнею — 313

Гравітаційна стала — коефіцієнт у формулі закону тяжіння Ньютона, який дорівнює $6{,}67 \cdot 10^{-8}$ $см^3/г \cdot сек^2$ — 249

Грам-молекула — число грамів речовини, що дорівнює її молекулярній вазі — 359

Граничний кут — кут падіння, при якому заломлений промінь ковзає вздовж межі поділу середовищ —436

Графік — рисунок, що зображає прямими або кривими лініями кількісні залежності між різними фізичними величинами — 249

Гук, Роберт (1635—1703) — англійський фізик і ботанік. Відкрив названий його ім'ям закон пропорціональності деформації прикладеному зусиллю. Указав на клітинну будову рослин — 441

Гучність звуку — психічне сприймання звуку, яке залежить від чутливості вуха, величини акустичного тиску і частоти звукової хвилі — 263

Гюйгенс, Хрістіан (1629—1695) — голландський оптик і математик, основоположник хвильових уявлень про природу світла, творець годинника з маятником — 433

Датчик — вхідна частина автоматичного пристрою, яка сприймає дію зовні і здійснює безперервне перетворення її у вид, зручний для передачі на інші частини пристрою — 331, 332

Дейтерій — важкий водень, у якого ядро атома — дейтон — складається з протона і нейтрона — 538, 547

Декарт, Рене (1596—1650) — французький філософ і математик. Ввів метод координат. Дав пояснення явищу райдуги. Відкрив властивості ряду кривих — 432

Демокріт (460—370 до н. е.) — старогрецький філософ, один з перших атомістів — 357

Детектор — прилад для виявлення якогось фізичного явища. Найбільш широко відомий детектор, що виявляє радіохвилі — 456, 478, 492

Деформація — зміна відносного положення частинок тіла під впливом зовнішньої сили — 372

Джоуль, Джемс (1818—1889) — англійський фізик; експериментально підтвердив закон збереження енергії. Його ім'ям названо одиницю роботи в системі МКСА — 272

Динатронний ефект — випускання електронів поверхнею анода при його бомбардуванні електронами, що вилітають з катода — 459

Диполь (електричний) — два однакових за величиною і протилежних за знаком електричних заряди, розміщених на деякій відстані. Магнітний диполь— магнітна стрілка — 406

Дисонанс — співзвуччя, що містять у собі близькі щодо частоти звуки. Одночасне звучання створює биття, які викликають неприємне відчуття — 265

Дисперсія — розходження змішаних світлових променів різного кольору, наприклад білого, при проходженні крізь заломлююче середовище — 441

Дифракційна решітка — прозора пластинка (або дзеркало), на яку нанесено непрозорі штрихи — 444

Дифракція — огинання хвилями зустрічних перешкод, при якому відбувається порушення прямолінійності їх поширення — 444

Дифузія — взаємне проникнення одного в одне фізичних тіл, приведених у стикання — 373

Дифузор — частина каналу труби, в якій відбувається сповільнення (розширення) потоку і зростання тиску — 299

Діаграма — графічне зображення, яке показує співвідношення величин — 396, 397

Діамагнітний — що виштовхується магнітним полем; діамагнітні властивості особливо яскраво проявляються у вісмуту — 420

Діапазон — у музиці сукупність усіх звуків від найнижчої до найвищої межі даного голосу або музичного інструмента — 470, 478, 484

Діафрагма (перегородка) — в оптичних приладах непрозора пластинка з круглим отвором змінного діаметра — 443, 444

Діелектрик — речовина, що має у звичайних умовах дуже малу електропровідність — 411

Діод — електронна лампа з двома електродами; її можна використовувати як випрямляч струму — 455

Довжина хвилі — відстань між точками простору, яку пробігає хвиля за час одного періоду — 434

Едісон, Томас (1847—1931) — американський винахідник. Відомий своїми дослідженнями у галузі запису звуку. Зробив ряд відкриттів, що мають технічну цінність (наприклад удосконалення волоска розжарення електричної лампочки)— 454, 455

Ейнштейн, Альберт (1879—1955) — найвидатніший німецький фізик, основоположник теорії відносності — 452, 527, 536
Експонометр — прилад для визначення експозиції при фото- і кінозніманні. Експозиція — доза опромінювання під час фотографування — 498
Еластичність — властивість матеріалу зазнавати значних пружних деформацій без руйнування — 371
Електрон — елементарна частинка, що несе мінімальний електричний заряд $4{,}8 \cdot 10^{-10}$ CGSE і має масу $9{,}1 \cdot 10^{-28}$ *г* — 403, 486
Електронографія—метод дослідження будови речовини, що грунтується на дифракції електронів — 474
Емітер — один з електродів транзистора — 493
Ерстед Ханс Крістіан (1777—1851) — датський фізик. Відкрив вплив струму на магнітну стрілку. Його ім'ям названо одиницю напруженості магнітного поля — 417
Ехолот — прилад для автоматичного вимірювання глибини шляхом уловлювання відбитих від дна ультразвукових хвиль — 273

Ж

Жоліо-Кюрі, Фредерік (1900—1958) — видатний французький фізик, разом з дружиною Ірен Кюрі відкрив штучну радіоактивність, в тому числі позитронну радіоактивність; перший президент Всесвітньої федерації наукових працівників і голова Всесвітньої Ради Миру — 517
Жуковський, Микола Єгорович (1847—1921) — великий російський вчений, основоположник сучасної гідро- і аеромеханіки. В. І. Ленін назвав Жуковського «батьком російської авіації» — 296, 308

З

Звичайний промінь у кристалі — один з двох променів (при подвійному променезаломленні), швидкість якого не залежить від напряму поширення— 446

І

Іваненко, Дмитро Дмитрович (нар. 1904) — радянський фізик-теоретик. Разом з Є. Н. Гапоном зробив припущення про протонно-нейтронну структуру атомного ядра — 518
Ізотермічний — що відбувається при незмінній температурі — 399
Ізотопи — різновидності хімічного елементу, що займають одну й ту саму клітку періодичної системи; мають однаковий заряд ядра, однакову будову електронної оболонки атомів, але різну атомну вагу — 532
Ізотропний — той, що має однакові фізичні властивості в різних напрямах — 365, 366
Імпульс — фізична величина, що визначається добутком сили на час її дії — 483
Індикатор — прилад для спостереження за ходом якогось фізичного процесу — 396
Індукційна котушка—прилад для перетворення напруги струму — 422
Індукція електромагнітна — виникнення електричного струму в замкненому контурі при зміні магнітного потоку, який його пронизує — 422
Інерція — властивість тіл зберігати стан відносного руху або спокою — 247
Інтервал звуковий — відношення частот коливань двох тонів — 265
Інтерференція — додавання в просторі двох або кількох хвиль, внаслідок чого буває підсилення або послаблення амплітуди результуючої хвилі залежно від співвідношення між частотами і фазами хвиль, що додаються — 443
Інтерферометр — прилад, у якому використовується для фізичних досліджень інтерференція світла — 444
Інфразвук — звукові хвилі, частота яких менша від 16 *гц* — 270
Інфрачервоні промені — невидимі промені з довжиною хвилі від 0,76 мікрона до 0,5 *мм* — 448
Інфузорія — один з видів найпростіших мікроорганізмів — 441
Іони — електрично заряджені частинки. Утворюються при втраті або набуванні електронів атомами або молекулами — 409, 414, 466, 523
Іоносфера — верхня частина земної атмосфери, яка складається з іонізованого газу і електронів. Починається на висоті 70 *км* і простягається до 400 *км* і вище — 465

Й

Йоффе, Абрам Федорович (нар. 1880) — радянський фізик, академік. Один з основоположників теорії напівпровідників — 496

К

Кавендіш, Генрі (1731—1810) — англійський фізик. Визначив сталу в законі тяжіння. Багато й плодотворно займався хімічними дослідженнями, зокрема визначив склад води — 248
Кавітація — процес, при якому відбувається різке зростання тиску в деяких точках рухомої рідини внаслідок «захлопування» пустот, що утворюються під час її розрідження — 275
Карданний підвіс — шарнірний пристрій, який дає змогу зберігати незмінним положення тіла при яких завгодно поворотах системи — 313
Карно, Саді (1796—1832) — французький інженер. У своїй праці «Міркування про рушійну силу вогню» висловив основне положення термодина-

міки про те, що роботу можна мати за рахунок запасу тепла при перенесенні його від нагрітого тіла до холоднішого — 399, 400
Квант енергії — цілком певна кількість енергії, яку вбирає або випромінює атом — 452, 536
Кварта — інтервал звуків при відношенні частот 3 : 4 — 264
Квінта — інтервал звуків при відношенні частот 2 : 3 — 264
Кельвін (Томсон), Уїльям (1824—1907) — англійський фізик, провадив визначні дослідження в галузі термодинаміки, електрики; зробив ряд важливих винаходів — 380
Кенотрон — двоелектродна вакуумна лампа з розжарюваним катодом, яка застосовується для випрямляння змінного струму — 491
Кібернетика — наука про зв'язок керування і контролю в машинах і живих організмах — 494
Кінескоп — електронно-променева трубка, що відтворює сигнали, які надходять від передавача — 481
Кінетична енергія — енергія руху — 255
Клістрон — надвисокочастотна електронна лампа; застосовується як генератор, підсилювач і помножувач частоти — 473
Коагуляція — об'єднання дрібних частинок у більші під впливом сил зчеплення — 274
Коаксіальний кабель — двопровідна лінія, в якій один провід прокладено всередині другого проводу, що має форму трубки — 482
Когерентні хвилі — хвилі, у яких коливання відбуваються з сталою різницею фаз — 443
Коефіцієнт — числовий множник при буквеному виразі або сталий множник при змінній величині — 299, 398
Кокрофт, Джон Дуглас (нар. 1897) — англійський учений, спеціаліст у галузі ядерної фізики. Директор Дослідного центру в Харуеллі — 516, 527
Колеоптер — вертикально злітаючий літак з кільцевим крилом. Зазор між крилом і корпусом використовують як прямоточний двигун. Колеоптери мають велику швидкопідйомність, але їх аеродинамічна якість нижча, ніж у літаків з плоскими крилами — 317
Конвертоплан — літак, повітряний гвинт якого можна повертати на 90°. При злітанні гвинт ставиться у вертикальне положення, а при переході на горизонтальний політ повертається паралельно осі машини. У деяких конструкцій рухомим є все крило з гвинтомоторною установкою — 316
Конфузор — частина труби, в якій при плавному звуженні потік газу або рідини прискорюється і тиск зменшується — 293
Корпускула — збірна назва для найдрібніших частинок речовини — 466
Космічні промені — потік частинок, в основному протонів, дуже високої енергії, який безперервно падає з світового простору на Землю — 522
Крилов, Олексій Миколайович (1863—1945) — академік; один з найвидатніших російських кораблебудівників, математик, механік; Герой Соціалістичної Праці. Переклав «Математичні начала натуральної філософії» Ньютона на російську мову — 290, 291
Кристал — тверде тіло, що має природну форму многогранника — 492
Кристалографія — наука про будову і властивості кристалів — 366
Критичний — числове значення величини, при якому стан речовини змінюється стрибком — 531
Крукс, Вільям (1832—1919) — англійський фізик і хімік. Відомий своїми дослідженнями катодних променів. Відкрив елемент талій. Винайшов спінтаріскоп, трубки для спостереження розряду і т. д. — 508
Кулон, Шарль Огюстен (1736—1806) — французький фізик. Відкрив закони взаємодії точкових електричних зарядів і магнітних полюсів. Дослідив причини тертя — 405, 512
Курчатов, Ігор Васильович (1903—1960) — один з найвидатніших радянських фізиків, академік; зробив фундаментальні відкриття в галузі ядерної фізики; був директором Інституту атомної енергії АН СРСР — 540, 545
Кюрі, П'єр (1859—1906) і Кюрі-Склодовська, Марія (1867—1934) — французькі фізики, які відкрили радій, полоній та інші радіоактивні речовини та їх властивості — 421, 505

Ланжевен, Поль (1872—1946) — французький фізик, відомий дослідник у галузі магнітних явищ. Вперше використав кварц для випромінювання і приймання ультразвукових хвиль — 421
Лауе, Макс (нар. 1879) — німецький фізик-теоретик. У 1912 р. для доведення хвильової природи рентгенових променів запропонував досліди по виявленню дифракції на кристалах — 449
Лебедєв, Петро Миколайович (1866—1912) — видатний російський фізик. Вперше виявив і виміряв тиск світла — 448
Левенгук, Антоні (1632—1723) — голландський натураліст. За допомогою винайденого ним мікроскопа виявив у краплині води інфузорії — 441
Ленц, Емілій Хрістіанович (1804—1865) — фізик, член Російської Академії наук — 423
Леонардо да Вінчі (1452—1519) — великий італійський художник. Був також інженером, лікарем, натуралістом — 437
Леонтович, Михайло Олександрович (нар. 1903) — відомий радянський фізик-теоретик, академік — 541
Лінза — прозоре тіло, обмежене правильними поверхнями (сферичними). Наприклад, природною лінзою є кришталик ока — 439
Локатор — прилад для визначення місцеположення тіла за допомогою відбитих від нього радіо- або ультразвукових хвиль —473, 483
Ломоносов, Михайло Васильович (1711—1765) — великий російський дослідник природи, філософ і літератор. Своїми дослідженнями в різних галузях знань заклав основи наук в Росії — 438, 440, 468
Лоренц, Гендрік Антон (1853—1928) — голландський фізик; творець електронної теорії і електродинаміки рухомих середовищ. Знайдені ним перетворення координат і часу систем відліку, які рівномірно рухаються, стали фундаментом теорії відносності — 258
Лукрецій Кар (99—55 до н. е.) — римський поет-філософ, автор поеми «Про природу речей» — 357

Люмінесценція — світіння речовини при поглинанні нею видимих або невидимих променів — 453
Люмінофори — речовини, що випромінюють світло під впливом видимих або невидимих променів — 475, 491

М

Магнетрон — електронна лампа, в якій взаємодія електронів з високочастотним електричним полем відбувається в перехресних постійних електричному і магнітному полях — 472
Магнітострикція — зміна геометричних розмірів магнітних тіл: заліза, нікелю та ін.— при їх перемагнічуванні — 273
Майєр, Юліус Роберт (1814—1878) — німецький вчений, який одним з перших сформулював закон збереження і перетворення енергії — 255
Майкельсон, Альберт (1852—1931) —американський фізик. Відомий точними вимірюваннями швидкості світла — 436
Максвелл, Джемс Клерк (1831—1879) — англійський фізик, здобув світову славу створенням електромагнітної теорії світла — 423, 427, 447, 463
Мандельштам, Леонід Ісакович (1879—1944) — видатний радянський фізик, академік. Відомий своїми дослідженнями в оптиці, теорії коливань і радіофізиці — 451
Манометр — прилад для вимірювання тиску газів і рідин —293, 294
Маріотт, Едм (1620—1684) — французький фізик. Незалежно від Бойля вивів закон, який показує залежність об'єму газу від тиску при незмінній температурі — 258
Мезони — нестійкі елементарні частинки, як заряджені, так і нейтральні — 403
Мембрана — пружна пластинка— 476
Менделєєв, Дмитро Іванович (1834—1907) — великий російський хімік; творець періодичної системи елементів — 503
Метацентр — для симетричного тіла — точка перетину напряму виштовхувальної сили з площиною симетрії тіла — 288
Метеорити — залізні або кам'янисті тіла, що падають на Землю з міжпланетного простору — 346
Міделевий переріз — найбільший за площею поперечний переріз довгастого тіла, наприклад корпусу судна, фюзеляжу літака — 297
Мікрокосмос — світ атомів і елементарних частинок — 502
Мікроскоп — оптичний прилад з системою стекол, що дають велике збільшення для розглядання предметів, які не можна бачити неозброєним оком — 441
Мікрофон —прилад, що перетворює звукові коливання в електричні — 476
Модуляція — процес «накладання» на радіохвилі коливань нижчих частот (наприклад тих, що відповідають частотам людського голосу) — 476
Молекула — найменша частинка даної речовини, що має її основні хімічні властивості — 501
Монохроматичне — одноколірне (світло) — 442

Н

Нейтрон — одна з основних частинок, що утворюють ядро атома, яка не виявляє ні позитивного, ні негативного електричного заряду. Маса нейтрона $1{,}6747 \cdot 10^{-24}$ *г* — 403, 518
Нуклон — загальна назва частинок (протонів і нейтронів), що входять до складу атомного ядра — 519
Ньютон, Ісаак (1643—1727) — великий англійський фізик і математик, основоположник класичної фізики — 433, 441

О

Обертон — верхній тон. Тон звуку, який супроводить основний тон, але більшої частоти — 262
Об'єктив — лінза (або їх система) в оптичному приладі, звернена до предмета — 440
Октава — звуковий інтервал при відношенні частот 1 : 2 — 264
Окуляр — лінза (або їх система) в оптичному приладі, звернена до спостерігача — 440
Ом, Георг (1787—1854) — німецький учений. Відомий дослідженнями в галузі електрики — 412
Оптика — розділ фізики, що вивчає властивості світла — 439, 446
Оптична вісь кристала — напрям, уздовж якого не відбувається подвійного променезаломлення — 446
Оптична густина — числове значення абсолютного показника заломлення — 436
Орбіта — шлях руху небесного тіла — 326
Остійність — здатність судна повертатися до положення рівноваги — 287
Осцилограф — електричний прилад для реєстрації і спостереження різних фізичних процесів — 333

П

Парамагнітні тіла — тіла, що орієнтуються вздовж напряму магнітного поля — 420
Параметр — величина, що характеризує ту чи іншу властивість процесу — 329, 392
Пара сил — дві однакові і паралельні сили, прикладені до різних точок тіла і напрямлені у протилежні сторони — 248, 249
Паскаль, Блез (1623—1662) — французький фізик, математик і філософ. Відомий дослідженнями рідин і газів. Встановив ряд закономірностей, названих його ім'ям — 258, 280
Пентод — п'ятиелектродна електронна лампа — 493
Період — проміжок часу, протягом якого процес, що повторюється, проходить від початку до кінця — 509

Період дифракційної решітки — відстань, що дорівнює ширині світлого і темного проміжків — 444
Перпетуум-мобіле — вічний двигун — 394
П'єзоелектричний ефект — поява електричних зарядів на поверхні деяких кристалів при їх деформації — 411
Пірометр — вид приладу для визначення температури тіла — 451
Плазма — в фізиці цілком іонізований газ, що складається з позитивно і негативно заряджених частинок, які рухаються хаотично — 541
Планк, Макс (1858—1947)—видатний німецький фізик. Дослідження законів теплового випромінювання привели його до квантової теорії випромінювання — 514
Пластичний — здатний набувати під тиском будь-якої форми, не ламкий — 372
Позитрон — позитивна елементарна частинка, що має масу електрона —519, 520
Поляризоване світло — світло, у якого площина коливань вздовж напряму поширення в оптично однорідному середовищі незмінна — 446
Поляриметр — прилад для вимірювання ступеня поляризації світла, а також обертання площини поляризації — 447
Понтон — порожнисте тіло, яке застосовують для швидкого наведення переправ і підіймання затонулих суден — 289
Попов, Олександр Степанович (1859—1905) — російський учений, винахідник радіо — 453, 455
Потенціал — величина, що визначається роботою сил поля — 409
Потенціальна енергія — енергія тіла, що визначається його положенням відносно інших тіл — 361
Потік енергії — енергія, яку переносить хвиля в напрямі поширення через одиницю поверхні за одиницю часу — 262
ППРД — прямоточний повітряно-реактивний двигун— 309, 310
ПРД — пороховий реактивний двигун — 311
Призма — многогранник з двома рівними і паралельними гранями — основами і бічними гранями — паралелограмами — 442
Призма Ніколя — прилад для перетворення природного світла в поляризоване — 447
Протон — одна з основних частинок, що утворюють ядро атома; маса протона $1{,}6724 \cdot 10^{-24}$ *г*, позитивний заряд $4{,}8 \cdot 10^{-10}$CGSE —403

Радіація — випромінювання — 496
Радіоактивність — самодовільний розпад ядер атомів деяких елементів, який супроводиться випромінюванням елементарних частинок і фотонів — 506
Радіоелектроніка — галузь техніки, що використовує вакуумні і напівпровідникові прилади — 481, 484
Радіорелейні лінії зв'язку — зв'язок, здійснюваний рядом приймально-передавальних радіостанцій; проміжні станції називаються ретрансляційними — 478
Ракета — літальний апарат з реактивним двигуном, що використовує пальне і окислювач, які знаходяться на самому апараті — 245, 247, 319, 347
Растр — система ліній, нанесених у певному порядку на яку-небудь поверхню — 482
Реактивний двигун — двигун, що перетворює хімічну енергію палива в кінетичну енергію газового струменя. При цьому двигун з літальним апаратом набуває швидкості у зворотному напрямі—304, 310
Резерфорд, Ернест (1871—1937) — один з найвидатніших англійських фізиків, відомий своїми відкриттями в галузі ядерної фізики — 507, 509, 512, 514
Резонанс — явище різкого збільшення амплітуди вимушених коливань, коли збігається власна частота коливного тіла з частотою дії зовнішньої сили — 461, 483
Рекомбінація — перетворення іонів в електрично нейтральні атоми і молекули шляхом приєднання або віддавання електронів — 414
Релятивістська механіка — механіка, що враховує закони відносності — 258
Реле — прилад, який певним чином реагує на порушення заданого режиму процесу — 478
Ремер, Олаф (1644—1710) — датський астроном. Вперше визначив величину швидкості світла — 434
Рентген, Вільгельм Конрад (1845—1923) — німецький фізик, що відкрив короткохвильове електромагнітне випромінювання — рентгенові промені — 449
Рентгенові промені — електромагнітні хвилі від 0,06 до 20 ангстремів завдовжки, що утворюються при бомбардуванні електронами катода у спеціальній вакуумній трубці — 449
Рефрактометр — прилад для вимірювання показника заломлення світла в даній речовині — 435
РРД — рідинний ракетний двигун — 306

Сегнетова сіль — подвійна калієво-натрієва сіль винної кислоти. Кристали цієї солі мають п'єзоелектричні властивості — 411
Сила звуку (інтенсивність звуку) — пропорціональна квадратові акустичного тиску — 261
Синхрофазотрон — установка для прискорення заряджених частинок, в якій частинки прискорюються електричним полем зростаючої частоти і рухаються в магнітному полі з дедалі більшою напруженістю — 239, 374
Скобельцин, Дмитро Володимирович (нар. 1892) — радянський фізик, академік. Автор ряду досліджень в галузі атомного ядра і космічних променів — 523
Снелліус, Віллеброрд (1580—1626) — голландський натураліст. Аналітично виразив закон заломлення світла незалежно від Декарта — 432
Спектральний аналіз — фізичний метод якісного і кількісного аналізу речовини шляхом вивчення її спектра — 445
Спектроскоп—прилад для спостереження спектрів —445
Спідометр — прилад для вимірювання швидкості руху саморухомих машин — 313
Спінтарископ — прилад для спостереження α-частинок за спалахами світла, що виникають від ударів частинок об екран з сірчистого цинку — 508
Стевін, Сімон (1548—1620) — нідерландський фізик і інженер. Відомий своїми працями в галузі меха-

ніки рідин і в математиці. Дав нове доведення закону рівноваги тіл на похилій площині — 281
Столєтов, Олександр Григорович (1839—1896) — російський фізик. Досліджуючи фотоелектричні явища, сформулював закони фотоструму. Запропонував метод вимірювання індукції магнітного поля — 421, 452
Супергетеродин — вид радіоприймача, в якому частота радіосигналу спочатку перетворюється в сигнал нижчої, «проміжної» частоти, а потім підсилюється — 475
Сцинтиляція — короткочасний спалах світла, який дають окремі заряджені частинки при їх вбиранні в середовищі — 515

Тамм, Ігор Євгенович (нар. 1895) — радянський фізик, академік, лауреат Нобелівської премії. Розробив разом з І. М. Франком теорію випромінювання електрона, що швидко рухається в середовищі — 541
Тахометр —прилад для вимірювання кутової швидкості (числа обертів) обертового тіла — 293
ТГД — турбогвинтовий двигун — 309
Телемеханіка — галузь техніки, що розробляє способи керування різними механізмами на відстані — 485
Тембр — особливе «забарвлення» звуку, яке утворюється внаслідок поєднання основного тону і тонів більш високої частоти, які його супроводять — 263
Температура — основна ознака теплового стану тіла, ступінь його нагрітості — 490
Термістор — напівпровідниковий прилад, який вимірює силу струму, що через нього проходить, в точній відповідності із змінами температури — 489
Термодинаміка — наука, що вивчає умови переходу теплоти в роботу — 395
Термоелектронна емісія — випромінювання електронів нагрітими тілами — 416, 455
Томсон, Джозеф Джон (1856—1940) — запропонував модель атома (1903) — рівномірно заповнену позитивним зарядом сферу, всередині якої знаходяться електрони — 508, 512
Тон — звук, породжуваний тілом, коливання якого відбуваються за гармонічним законом з незмінною частотою — 262, 264
Торрічеллі, Еванджеліста (1608—1647) — італійський математик і фізик. Відомий дослідженнями пружності повітря і створенням барометра — 258, 373
Транзистор — напівпровідниковий прилад, який часто називають кристалічним тріодом. Може підсилювати радіосигнали і, отже, замінити радіолампу — 493
ТРД — турбореактивний двигун — 310
Трек — слід, який лишає рухома частинка на фотопластинці, в газі або в рідині — 423
Тригер — спеціальна схема з електронними лампами — 485
Тритій — радіоактивний ізотоп водню, ядро атома якого складається з протона і двох нейтронів — 538
Тріод — триелектродна електронна лампа — 456, 493
Туполєв, Андрій Миколайович (нар. 1888) — радянський авіаконструктор, академік — 308
Турбулентна течія — течія рідини (або газу), при якій елементи рідини (газу) рухаються невпорядковано, неусталено по складних траєкторіях, що приводить до посиленого перемішування рухомої рідини (або газу) — 298

Ультразвук — пружні хвилі з частотою понад 15 000—20 000 *гц*. Найвищі частоти ультразвуків спостерігались до 10^9 *гц* — 271
Ультрафіолетове випромінювання — невидиме випромінювання з довжиною хвилі від 4000 до 150 ангстремів — 449, 466
Умов, Микола Олексійович (1846—1915) — російський фізик і математик. Відомий дослідженнями енергії пружних хвиль — 261

Фаза — окрема стадія в розвитку якогось процесу — 434, 444
Фалес Мілетський (624—548 до н. е.) — старогрецький філософ і вчений — 404
Фарадей, Майкл (1791—1867) — один з найвидатніших англійських фізиків. Зробив ряд важливих відкриттів, в тому числі першим виявив електромагнітну індукцію — 405, 422, 448
Ферити — речовини, які після спеціальної обробки набувають цінних магнітних властивостей і є феромагнітними напівпровідниками — 494
Фермі, Енріко (1901—1954) — італійський фізик, основоположник теорії елементарних частинок, один з творців першого атомного реактора — 521, 527
Феромагнетизм — магнітні властивості речовин, що належать до групи сильномагнітних тіл — 420
Фізо, Іпполіт (1819—1896) — французький фізик, відомий вимірюванням швидкості світла — 435
Фільтр — речовина або установка для очищення рідин проціджуванням; світлофільтр — прилад, що вбирає хвилі певної довжини — 451
Флеров, Георгій Миколайович (нар. 1913) — радянський фізик, чл.-кор. АН СРСР. Разом з К. А. Петржаком виявив спонтанний поділ ядер урану — 530
Флуоресценція — один з видів люмінесценції — 453
Фокус — точка на оптичній осі системи відбиваючих або заломлюючих кривих поверхонь, в якій перетинаються промені після їх відбивання або заломлення біля цих поверхонь — 474
Форсажна камера — камера допалювання пального в деяких видах реактивних двигунів — 310
Форсунка — пристрій для розпилювання палива, який забезпечує його повніше згоряння — 320
Фосфоресценція — світіння люмінофору, яке триває після припинення збудження — 453, 504

Фотоелемент — прилад, що перетворює енергію випромінювання в електричну — 498
Фотоіонізація — іонізація молекул і атомів під впливом світла — 451
Фотометр — прилад для вимірювання сили світла — 430
Фотон — частинка випромінювання, енергія якої дорівнює одному кванту — 497
Френель, Огюстен (1788—1827) — основоположник хвильової механічної теорії світла. Відомий теоретичними і експериментальними дослідженнями багатьох оптичних явищ — 433
Фуко, Леон (1819—1868) — французький фізик, відомий вимірюванням швидкості світла, дослідженнями магнітних і електричних явищ (струми Фуко), а також доведенням обертання Землі (маятник Фуко) — 435, 436

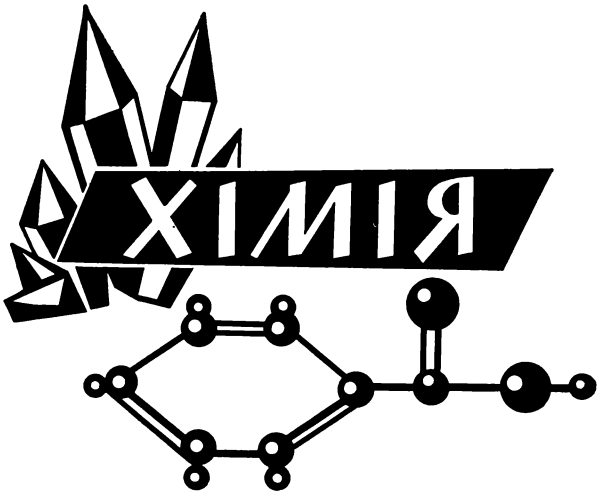
Хвиля — поширення коливань у просторі — 434

Центр ваги тіла — точка прикладання рівнодійної сил ваги — 252
Цикл — процес, в кінці якого тіло повертається до початкового стану — 537

Ціолковський, Костянтин Едуардович (1857—1935) — видатний російський учений і винахідник. Зробив ряд важливих відкриттів у теорії міжпланетних сполучень і ракетній техніці — 251, 293, 320

Чаплигін, Сергій Олексійович (1869—1942) — радянський учений, академік, Герой Соціалістичної Праці, один з основоположників газодинаміки — 308
Чедвік, Джемс (нар. 1891) — англійський фізик. Відкрив нейтрон. Очолював групу англійських учених, що брали участь у створенні атомної бомби в США — 518
Черенков, Павло Олексійович (нар. 1904) — радянський фізик, лауреат Нобелівської премії. Відкрив випромінювання заряджених частинок у середовищі, коли вони рухаються з швидкістю, що перевищує швидкість світла в даному середовищі — 525

Юнг, Томас (1773—1829) — англійський дослідник природи. Відомий своїми дослідженнями в оптиці. Пояснив, зокрема, явище інтерференції світла — 443



ХІМІЯ ТА ЇЇ РОЛЬ У ЖИТТІ ЛЮДЕЙ

«Широко простягає хімія руки свої у справи людські», — сказав двісті років тому один з основоположників сучасної наукової хімії геніальний російський учений М. В. Ломоносов, виголошуючи «Слово про користь хімії» у прилюдному зібранні Академії наук.

Сьогодні справедливість цих слів ясна і зрозуміла кожній людині в світі. Сучасна техніка, і в першу чергу космонавтика, авіація і атомна промисловість, використовує добуті хіміками нові типи матеріалів, легких, міцних, матеріалів з незвичайними властивостями, стійких до різноманітних впливів.

Різні галузі народного господарства споживають сотні тисяч тонн продукції хімічної промисловості (кислот, солей, лугів, синтетичного каучуку, пластичних мас, штучних і синтетичних волокон, синтетичних спиртів, миючих засобів, органічних речовин — напівпродуктів для виготовлення різноманітних матеріалів, лаків, барвників). Транспорт в результаті застосування хімічних методів у нафтовій промисловості одержує високоякісне паливо і мастила.

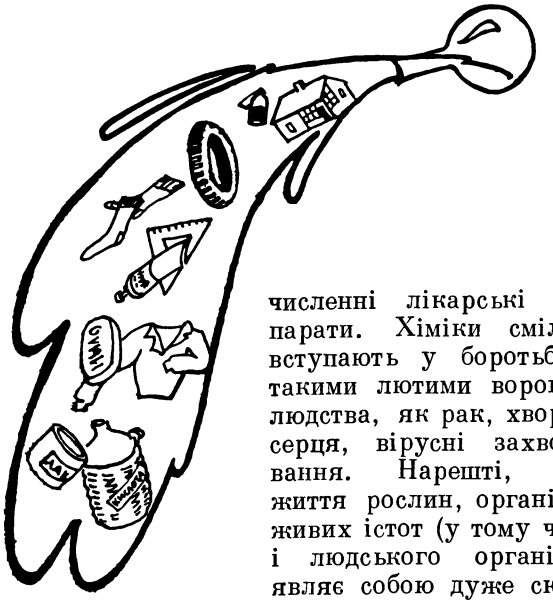
Сільське господарство використовує у величезних кількостях мінеральні добрива, речовини для боротьби з шкідниками сільськогосподарських рослин (інсектициди), для знищення бур'янів (гербіциди), а також для регулювання росту рослин (ростові речовини).

Завдяки досягненням хімії надзвичайно змінився побут людини. Все більше і більше по-

ширюється одяг із штучних і синтетичних волокон, красивий і міцний.

Застосування хімії у харчовій промисловості дозволяє поліпшувати властивості харчових продуктів, надавати їм нових смакових якостей, довгий час зберігати у свіжому вигляді.

Велика роль хімії у боротьбі з захворюваннями людини, у боротьбі за її здоров'я і довголіття. Спеціальна галузь хімічної промисловості — хіміко-фармацевтична — виробляє



численні лікарські препарати. Хіміки сміливо вступають у боротьбу з такими лютими ворогами людства, як рак, хвороби серця, вірусні захворювання. Нарешті, саме життя рослин, організмів живих істот (у тому числі і людського організму) являє собою дуже складну сукупність численних і різноманітних хімічних процесів.

У травні 1958 р. відбувся Пленум Центрального Комітету Комуністичної партії Радянського Союзу, який схвалив постанову про прискорення розвитку хімічної промисловості і особливо виробництва синтетичних матеріалів і виробів з них для задоволення потреб населення і народного господарства. Ця постанова означає початок нового розквіту хімічної науки і промисловості в нашій країні. Вирішальну роль в її виконанні має відіграти радянська молодь — сьогоднішні піонери і комсомольці. Почесно бути хіміком, і молодь стане у ряди армії, що штурмує висоти хімічної науки, створює нові промислові хімічні процеси, будує заводи, працює на них.

Що ж таке хімія? Що таке хімічна реакція, яка лежить в основі добування потрібних людині речовин і продуктів?

Д. І. Менделєєв, творець славетної періодичної системи елементів, так відповів на питання про те, що таке хімія, у своїй праці «Основи хімії»: «Найближчий предмет хімії становить дослідження однорідних речовин, із складання яких утворені всі тіла світу, перетворень їх одне в одного і явищ, що супроводять такі перетворення».

Отже, хімія вивчає не тільки речовини самі по собі, а й процес хімічного перетворення, тобто механізм змін, що відбуваються з речовинами при хімічних реакціях, в результаті яких вихідні речовини перетворюються у потрібні людині продукти. При цьому хімік спостерігає найрізноманітніші явища — зміну забарвлення розчинів, утворення осадів, виділення газів, світіння, горіння, вибухи і т. д. Хімік повинен знати, чому виникають ці явища, повинен вміти використовувати їх у тих випадках, коли вони корисні, і переборювати, коли вони шкідливі.

Хімік-учений, інженер, лаборант пізнають механізм хімічних перетворень, широко використовуючи методи сучасної фізики, побудовані на математичному аналізі досліджуваних явищ. Отже, вони повинні добре знати не тільки хімію, а також фізику і математику. Фізика дає змогу зрозуміти природу хімічних сил, які удержують у молекулах атоми і примушують їх утворювати нові молекули в ході хімічних перетворень.

Фізичні методи дослідження дозволяють хімікові не тільки вивчити кінцеві продукти реакції, але й «заглянути всередину» хімічної реакції, «побачити» поведінку молекул вихідних речовин і утворення проміжних продуктів. Сучасні фізичні методи дозволяють зареєструвати у складних хімічних реакціях утворення так званих «вільних радикалів» — дуже малостійких частинок, що живуть менш як одну десяти- і стомільйонну частку секунди. Вільні радикали — це осколки молекул. Вони мають велику хімічну активність. У ряді випадків додавання вільних радикалів у посудину, в якій відбувається хімічна реакція, значно прискорює процес, дозволяє дістати продукт з новими корисними властивостями.

Вільні радикали являють собою проміжні продукти («активні центри») ланцюгових хімічних реакцій. Ланцюгові реакції — це чудовий механізм багатьох хімічних реакцій.

Ланцюгові реакції дуже чутливі до різних впливів. Якщо хімік вживатиме таких впливів, які приводять до утворення вільних радикалів, то ланцюгів буде зароджуватись усе більше і більше і реакція піде швидше. Вільні радикали можна створювати, впливаючи на речовини нагріванням, світлом, радіоактивними випромінюваннями, електричним розрядом і т. ін.

Ланцюгові реакції відбуваються, наприклад, при полімеризації, яка дозволяє добувати різноманітні високомолекулярні синтетичні матеріали; при крекінгу, що дає високоякісні бензини; при хлоруванні органічних речовин, внаслідок якого утворюються отрутохімікати, засоби для гасіння пожеж, розчинники і т. д.

У тих випадках, коли в ланцюгових процесах під час реакцій одного вільного радикала утворюється більш як один новий радикал (наприклад три), реакція самоприскорюється і може привести до займання. Це — так звані ланцюгові розгалужені процеси. У багатьох випадках самоприскорення розвивається повільно, як-от при окисленні органічних речовин (наприклад вуглеводнів з нафти). В результаті утворюються продукти окислення (сировина для синтезу високополімерів та ін.).

Вільні радикали легко захоплюються різними сторонніми молекулами, тому ланцюгову реакцію неважко «обірвати». У деяких випадках це корисно, тому що багато ланцюгових реакцій є небажаними (наприклад окислювальне псування харчових жирів, «старіння» крекінг-бензинів і мастил та ін.).

Тепер учені вже вміють нагромаджувати і зберігати вільні радикали у «замороженому» стані, застосовуючи наднизьку температуру. Вони досліджують їх властивості і відшукують нові шляхи технічного використання.

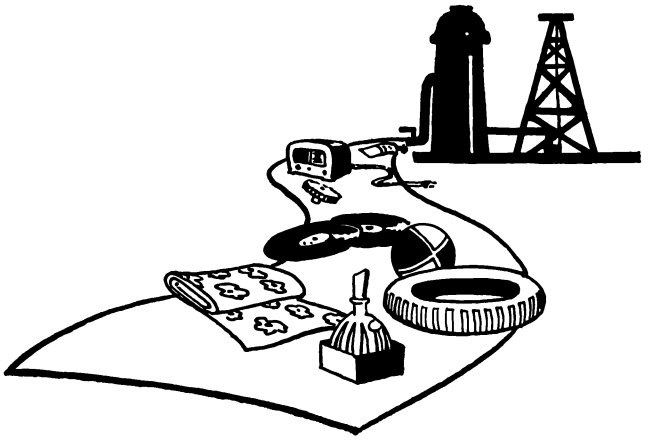
В усіх цих дослідженнях хіміки працюють спільно з фізиками, а в тих випадках, коли потрібні серйозні математичні обчислення, — ще й з математиками. Нині для дослідження багатьох складних хімічних процесів вживається найдосконаліша обчислювальна техніка — електронні лічильні машини.

Цікаво відзначити, що хіміки відкрили ланцюгові реакції в хімічних процесах на два-три десятиліття раніше, ніж фізики відкрили ланцюговий процес поділу атомних ядер урану і плутонію. З цього відкриття фізиків почалась епоха атомної енергії.

Хіміки ж мають тепер усі можливості для того, щоб всебічно використати властивості ланцюгових реакцій у хімії і створити на цій основі такі хімічні виробництва, які дозволили б говорити про епоху ланцюгових хімічних реакцій.

Дедалі більшого значення набуває фізична хімія — галузь науки, в якій спільно працюють хіміки і фізики. Саме фізико-хіміки вивчають таке варте уваги явище, як каталіз — прискорення хімічних реакцій. Вони працюють над добуванням твердих матеріалів з наперед заданими властивостями, спираючись при цьому на знання тих фізико-хімічних явищ, які відбуваються у твердих тілах при використанні їх у виробництві.

Фізико-хіміки досліджують хімічні реакції, що відбуваються під дією електричного



струму, і, навпаки, явища утворення струму в результаті хімічних реакцій (процес, що відбувається в акумуляторах).

Хіміки-органіки активно працюють над створенням так званих елементоорганічних сполук. Це — органічні сполуки, в молекулах яких, крім атомів вуглецю, водню і кисню, є також інші елементи — фосфор, фтор, кремній, титан, алюміній та ін. Елементоорганічні сполуки широко використовуються для створення нових типів пластмас, каучуків, лікарських препаратів, отрутохімікатів і т. ін.

Хіміки-органіки розробляють нові методи добування вихідних речовин («мономерів») для синтезу високомолекулярних речовин (синтетичних волокон, пластмас, каучуків і т. ін.).

Хіміки, які працюють в галузі нафтохімічної промисловості, розробляють процеси добування багатьох цінних хімічних продуктів шляхом хімічної переробки нафти.

Велику увагу приділяють тепер біологічній хімії і дослідженню так званих біологічно активних речовин. Біохіміки вивчають вітаміни — важливу складову частину продуктів харчування; ферменти — біологічні каталізатори, які керують усіма біохімічними процесами, що відбуваються в організмі; антибіотики (пеніцилін, стрептоміцин та ін.), що мають величезне значення для лікування численних захворювань (туберкульоз, тифи, дизентерія і т. ін.); гормони — речовини, які виробляються в організмі і активізують багато важливих біохімічних процесів; білки—головну складову частину живого тіла та багато інших органічних сполук.

Останнього часу біохіміки відкрили явища, які свідчать, що в організмі тварин і рослин протікають різні хімічні процеси, при яких теж утворюються вільні радикали. У ряді випадків це дозволяє зрозуміти характер розвитку багатьох хвороб і дає змогу відшукувати засоби боротьби з ними, використовуючи різні хімічні (лікарські) впливи.

Хіміки-неорганіки працюють над добуванням і використанням у практиці багатьох елементів, які до самого недавнього часу майже не знаходили собі застосування. Так, германій застосовують в техніці напівпровідників, цирконій і берилій використовують в атомних реакторах. Багато рідкісних елементів знаходить застосування при створенні жаротривких та інших спеціальних сплавів і т. ін.

Ми перелічили тільки деякі з основних проблем, над якими працюють сучасні хіміки. В дійсності роль хімії у житті людини незмірно більша, і в тій чи іншій формі вона охоплює майже всі галузі її практичної діяльності. Згідно з ухвалами XXI з'їзду КПРС, обсяг продукції хімічної промисловості зросте у нашій країні протягом найближчої семирічки у три рази. Це вимагає підготовки багатьох десятків тисяч інженерів-хіміків і кваліфікованих робітників хімічної промисловості. Тому немає ніякого сумніву в тому, що багато читачів цієї книги виберуть собі професію хіміка і підуть працювати на одне з підприємств хімічної промисловості.

У дальших статтях наші юні читачі знайдуть багато відомостей з галузі хімії, які будуть дуже корисні не тільки тим, хто захоче присвятити своє життя цій захоплюючій науці, але й тим, хто мріє стати металургом, агрономом, лікарем, бо вплив сучасної хімії і проникнення її в інші науки величезні.

Історія хімії

ЯК ВИНИКЛА ХІМІЯ

Початок хімії губиться в тумані далекої давнини; неясне і походження самого слова «хімія». Очевидно, воно походить від слова «Хемі» — стародавньої назви Єгипту. Слово «хімія» вперше з'явилось наприкінці III ст. н. е. у працях александрійських учених, де під «хемією» розуміли мистецтво «чорної країни Хемі» — Єгипту.

За рівнем розвитку техніки Єгипет був передовою країною стародавнього світу. В Єгипті за тисячоліття до нашої ери добували золото, мідь, срібло, залізо, свинець і олово.

Усі ці метали, крім самородного золота, доводилось добувати з руд. Добуваючи метали, не турбувались про виснаження їх запасів. Стародавні металурги були впевнені, що на місці добуваних металів при доступі всередину землі повітря увесь час «виростають» нові метали, народжуються нові руди... Приблизно за 300 років до н. е. навчились перетворювати «червоний мінерал» (кіновар — HgS) у загадкову сріблясто-білу металічну рідину (ртуть). Важка, холодна, «вертка», вона викликала великий подив, а потім, через тисячоліття, набула винятково важливого значення в роботі алхіміків.

Ще за тисячу років до нашої ери єгиптяни навчились «варити» скло. Для варіння вживали соду і поташ; соду добували з природних содових озер, які зустрічаються в Єгипті, а поташ діставали з деревної золи або із золи морських водоростей. Обидві солі застосовували для виготовлення мила.

Цікаво, що мило в ті часи вживали як крем, який знатні єгиптянки накладали на обличчя.

У Стародавньому Єгипті широко були розвинуті хімічні ремесла. Єгиптяни вміли дубити шкіру, екстрагувати з рослин лікарські і запашні речовини, виготовляти керамічні вироби, добувати різноманітні фарби.

З усіх добуваних єгипетськими майстрами речовин найціннішими були золото і пурпур. Золото відкривало усі двері, робило людину могутньою. Бажання володіти золотом породило спокусливу ідею добувати його із звичайних дешевих металів — міді, свинцю, заліза.

Можливість такого добування підтверджувалась життєвими спостереженнями. Не раз бачили, як залізний ніж, що впав у синьозелену воду мідних рудників, перетворювався у «мідний». Появу шару червоної міді, витісненої залізом із мідного купоросу рудничної води, вважали за перетворення заліза в мідь. Але якщо залізо перетворюється в мідь, то, очевидно, і мідь можна перетворити в золото. Випадкові спостереження показали, що для такого перетворення потрібно у розплавлену мідь кинути кусок каменя «галмею» (цинкова руда).

Добуване таким способом «штучне золото» (латунь — сплав міді з цинком) не можна відрізнити від справжнього — воно має той самий колір, той самий дивовижний блиск...

Одну тільки хибу має «штучне золото»: воно з часом «захворює» — вкривається зеленим «висипом» і «виразками». Хвороби, як вірили єгиптяни, приносять людині (і металам) злі духи. Їх «відганяли» спеціальними заклинаннями — молитвами. Ці заклинання «для профілактики» почали промовляти і при виготовленні «штучного золота»... Ось чому до різних хімічних робіт єгиптян почала домішуватись містика.

Мистецтво добування золота та інших цінних речовин віддавна називали «священним мистецтвом». Воно становило монополію жерців. При єгипетських храмах були лабораторії. Вхід до них був закритий для всіх, крім жерців і синів фараонів. У лабораторіях, очевидно, працювали «засекречені» майстри-фахівці, які передавали свій досвід з покоління в покоління...

Єгипет багатів. Одночасно поширювався погляд, що своїм багатством він зобов'язаний «священному мистецтву».

Під впливом астрологів у «священне мистецтво» проникло містичне вірування у зв'язок між небесними світилами і металами. Астрологи твердили, що кожній планеті на небі відповідає певний метал на землі: Сонцю, звичайно, — золото, блідому Місяцю — срібло, Венері — мідь, Меркурію — ртуть, Юпітеру — олово, Сатурну, що повільно рухається, — важкий свинець, червонуватому Марсу — залізо, що гримить у боях. Кожна планета віддавна позначалась особливим значком. Цими ж значками почали позначати і «споріднені» планетам метали. (Назви «меркурій» для ртуті і «сатурн» для свинцю зберігались аж до кінця XIX ст.).

Виготовлення штучного золота у III ст. н. е. набуло такого розмаху, що імператор Діоклетіан видав указ про спалення всіх єгипетських рукописів, у яких наводяться рецепти добування золота. Указ було виконано. Але, на щастя для істориків хімії, кілька рукописів (папірусів) збереглось. Вони були знайдені на початку XIX ст. під час археологічних розкопок однієї гробниці у Фівах. У папірусах є цікаві малюнки перегінних апаратів, колб, печей та ін., дано описи обробки металів і рецепти грубих підробок «золотих» сплавів, імітацій дорогоцінних каменів і т. д.

ЯК ХІМІЯ ПЕРЕТВОРИЛАСЬ В АЛХІМІЮ

У VII ст. Єгипет був захоплений арабами. Вогнем і мечем було знищено багато культурних цінностей. Але завойовники, що наповнили Єгипет, зацікавились хімією. До слова «хімія» вони додали арабську приставку «ал» —

з'явилось слово «алхімія». Під такою назвою надалі почали розуміти науку або мистецтво перетворення металів у золото.

Підкоривши у VIII ст. майже всю Іспанію, араби створили там свою державу, що пізніше дістала назву «Кордовський халіфат». Столиця халіфату Кордова, гомінке місто з півмільйонним населенням, з 27 вищими учбовими закладами (арабські академії), з величезними бібліотеками, славилась як найбільший науковий центр у Європі. Тисячі юнаків з усіх європейських країн тяглися до кордовських академій, щоб вивчати астрономію, геометрію, алгебру, медицину, алхімію та інші науки.

Засвоївши середньовічну науку, молодь поверталась на батьківщину, де своїми захопленими оповіданнями про алхімічне добування золота сприяла поширенню алхімії. Таким чином алхімія, що зародилась в Єгипті, перекочувала з арабами в Кордову, а звідти— у західноєвропейські держави.

Безглузді чутки про неймовірні збагачення алхіміків з допомогою алхімічних «трансмутацій» (перетворень) розпалювали інтерес до таємничої науки, і алхімія почала ширитись по Європі, де в VIII ст. досягла свого розквіту.

Першим видатним алхіміком був арабський учений Джабір Ібн-Хайян (VIII ст.), відомий в Європі під ім'ям Гебера. На відміну від усіх туманних середньовічних алхімічних трактатів, праці Джабіра написані ясно, причому основне місце у них займає опис хімічних операцій — возгонки, перегонки, кристалізації і т. д. Джабір прославився створенням «хімічної теорії» будови металів. На цій «теорії» грунтується уся тисячолітня «творча» робота алхіміків.

За теорією Джабіра метали вважали за речовини, що складаються з сполучення двох «начал» («принципів», або «елементів»): сірки (сульфуру) і ртуті (меркурію).

Дивовижна ртуть, що розчиняє усі метали і знову виділяє їх при нагріванні амальгам, є матір'ю усіх металів («метали народжуються із ртуті»). Сірка — сульфур — батько металів.

Ось що пише про ртуть якийсь алхімік у книзі «Із записок алхіміка»:

«Сім металів створив світ
По числу семи планет;
Дав нам космос на добро
Мідь, залізо і срібло,
Злато, олово, свинець.
І спіши, мій син, узнати —
Всім їм ртуть — рідна мати!»

У цьому поетичному творі цікаві перші два рядки. Вони свідчать про те, що ідея зв'язку металів з планетами процвітала і в середні віки.

Ртуть вважалась носієм металічних властивостей металів, а сірка обумовлювала змінність металів від вогню. Ртуті приписували надзвичайні, надприродні властивості. Так, деякі алхіміки твердили, що після розчинення золота в ртуті кількість його зростає, ртуть, як говорили, «розмножує» золото.

Скільки часу, засобів, а головне, здоров'я змарновано було на спроби «розмноження» золота, аж доки не переконались, що золото, на жаль, не розмножується, а, навпаки, в процесі спроби його стає трохи менше (внаслідок неминучих втрат)!

За алхімічною «теорією» для перетворення свинцю, заліза і будь-якого іншого металу в золото, крім віри і пристрасного бажання, потрібно було мати якісь чудодійні «медикаменти», які поділяли за ступенем їх сили і навіть за «доброчесністю» на порядки. Медикаменти першого порядку спричиняють невеликі зміни в металі, медикаменти другого порядку вже надають неблагородним металам деяких властивостей благородних, і лише медикамент третього порядку — «камінь філософів», він же «великий елексир», або «магістеріум», — «кинутий на метал або на недосконалу речовину, робить їх досконалими (перетворює в золото) в момент доторку» (Бекон, «Зображення алхімії»).

Думки вчених про силу «філософського каменя» розходились. Так, Роджер Бекон твердив, що унція «великого елексиру» здатна перетворити в чисте золото мільйон унцій свинцю або заліза.

Алхімік Вілановіус був трохи скромніший: за його розрахунками, унція «великого елексиру» перетворює в золото всього 100 унцій іншого металу.

«Філософський камінь» є універсальним «медикаментом», саме лише доторкання його до кволого, беззубого, лисого безпомічного старика миттю перетворює його на сповненого здоров'я красеня-юнака.

Запевняли, що «адепти», тобто щасливі володарі «філософського каменя», можуть продовжити своє життя до 400 і більше років, і на підтвердження цього наводили приклади довгого життя апокрифічних патріархів, які нібито вживали «життєвий елексир» у краплях.

Як же алхіміки практично в лабораторіях намагались дістати «філософський камінь»? З якої сировини? Шляхом яких хімічних операцій?

Здавалось би, відповіді на ці питання можна дістати у численних алхімічних трактатах. Але вони написані такою незрозумілою, туманною мовою, що, читаючи їх, надзвичайно важко дійти до змісту.

«Таємниці надто дорогоцінні, щоб їх відкривати простому народові», або, як говорили, «профанам». «Філософи поклялись ніколи цього не відкривати» і т. д., «бо бог хоче, щоб це залишилось прихованим...»

Крім таких «важливих» причин, була ще одна, можливо, поважніша — рятування честі «алхімічного мундира». Адже ж напиши алхіміки свій «рецепт» добування «філософського каменя» простими, зрозумілими словами, кожний, хто точно за рецептом готуватиме камінь і його не добуде, усю вину покладе на автора...

Звідси і увесь той містичний туман, який оповиває трактат, і незрозумілі слова та вирази, під якими можна розуміти все що завгодно. Алхімічні трактати рясніють такими незнаними назвами препаратів, як «зелений лев», «хвіст і кров дракона», «плямиста пантера», «червоний жених і лілейна наречена», «іхневмон», «василиск» і т.д.

Ось приклад одного рецепта, автор якого люб'язно йде назустріч читачеві, розбиваючи всі хімічні операції по пунктах:

1) ми сполучаємо, тобто робимо А з крові дракона і меркурію (ртуті); 2) ми піддаємо гноїнню і переварюванню при подвійному жарі сказане А; 3) після того як воно згноєне і переварене, ми його розрішаємо; 4) після розрішення відокремлюємо і розділяємо; 5) після відокремлення і розділення ми його очищаємо й чистимо.

От і все — «філософський камінь» добуто!

Читати праці алхіміків — це подвиг. Навмисне незрозуміло написані, вони рясніють ще й алхімічними знаками, одні з яких повинні позначати речовини, другі — апаратуру, треті — хімічні операції. Славетний в'язень Шліссельбурзької фортеці, революціонер, вчений М. О. Морозов з великими труднощами розшифрував ці загадкові знаки і звів їх у таблицю.

Зустрічаючи у книзі незрозумілі значки, читач мимоволі переймався повагою і до вченості автора, і до самої таємничої науки. Тому алхіміки дуже любили значки і пишалались «неперевершено розумною книгою», складеною тільки з алхімічних знаків («німа книга»).

Погляди алхіміків на природу і фізичні властивості «філософського каменя» розходились:

«Він і мінерал, і рослина, і тварина», — пише один. «Він все руйнує, розчиняє, заморожує і розжарює», — говорить другий. «Він вологий, сприяє травленню», — твердить третій і т. д. Цікаво, що про камінь пишуть так, немовби його вже добували, тримали у руках і проробляли з ним різні хімічні досліди.

Що ж являли собою середньовічні алхіміки? Спочатку це були чесні, здатні захоплюватись вчені, що сліпо вірили в алхімічні нісенітниці і все життя шукали «філософський камінь».

Ці нещасні трудівники не кидали своїх робіт, незважаючи

Таблиця 33. В лабораторії алхіміка.

на постійні невдачі, незважаючи на тяжкі отруєння парою ртуті, окислами азоту, сірчистим газом та ін.

На середньовічних гравюрах багато алхіміків зображено у чернечому одягу з чотками у руках. Алхімія перебувала під особливим наглядом і підтримкою церкви. У католицьких монастирях були лабораторії, в яких працювали монахи-алхіміки.

Церква підтримувала алхімію насамперед тому, що через своїх учених-монахів мала надію збагатіти. Крім цієї чисто економічної причини, була й інша, не менш важлива: алхімія сповнена містики, робота алхіміка заснована на вірі у надприродне, чудесне — як же не підтримати таку науку?!

Щоб мати уявлення про життя і роботу учених-алхіміків, ознайомимось з біографіями двох прославлених учених.

Ось із темряви жахливого середньовіччя постає трагічна фігура великого вченого XIII ст. англійця Роджера Бекона. Він скінчив Оксфордський університет. З кафедри він сміливо проповідував, що основою справжньої науки є спостереження і дослід, а не сліпа віра в авторитет і традиції. І доводиться дивуватись, як ці прогресивні погляди вченого могли уживатись поряд з його захопленням алхімією.

Якесь невдало сказане і неправильно зрозуміле слухачем речення викликало чутки про те, що «філософський камінь» Бекон уже здобув! Беконом зацікавились «святі отці» католицької церкви; під їх тиском вчений стає ченцем і починає працювати у монастирській лабораторії. Щоб прискорити роботи, сам папа влаштовує Бекона в лабораторію Паризького університету. Там Бекон працює під таємним наглядом ченців-сищиків. Невтомна робота вченого викликає захоплення. Бекона називають «doctor mirabilis»— «дивовижний доктор». Разом із зростанням слави Бекона зростає впевненість папи в тому, що алхімічний секрет Беконом відкритий і камінь здобутий, але вчений не бажає поділитися секретом.

Бекона без кінця допитують, вимагають відкрити таємницю, але вчений мовчить. Що він може сказати, якщо вся його праця не дала жодних результатів...

І ось Бекона кидають у в'язницю, в одиночне ув'язнення, позбавляють права листуватись, розмовляти, знатись будь з ким. Через багато

років папа наказує в'язневі чесно написати все, що той знає про способи добування золота.

Бекон пише три великі монографії. Папа і кардинали вивчають подані праці, звичайно, нічого не розуміють і приходять до сумного висновку: таємниця добування «філософського каменя» Бекону невідома.

Після двадцятилітнього одиночного ув'язнення двері тюрми відкриваються; Бекон на волі. Він вирішує залишити Францію і втікає в Оксфорд, де знову береться до розшуків «філософського каменя». Але Бекона знову кидають у в'язницю, знову вимагають видати секрет; минає ще чотири роки одиночного ув'язнення, і Бекон — кволий 80-літній старик — вмирає...

А ось яскраве світило на алхімічному горизонті — Альберт Больштедський, відомий під ім'ям Альберта Великого. Лікар, філософ, математик, фізик, алхімік і ритор, Альберт був ходячою енциклопедією усіх знань XIII ст. Його ерудиція навіювала на сучасників жах і була причиною того, що вченого запідозрили у чарівництві.

Біографи цілком серйозно розповідали, як Альберт виготував живу людську голову, з якою ночами консультувався з різних питань.

Таблиця 34. Ломоносов за виготовленням забарвлених стекол.

Парацельс — Філіпп Ауреол Теофраст Бомбаст фон Гогенгейм (1493—1541).

Альберт не потрапив у в'язницю тільки тому, що займав кафедру богослов'я, був єпископом.

Останні 15 років життя Альберт посилено працював у монастирській лабораторії і зробив чимало важливих відкриттів.

Він перший виділив і описав миш'як, природа якого була встановлена тільки через чотири століття. Нескінченні експериментування з сіркою і ртуттю привели вченого до відкриття сульфідів (сірчистих металів). Сульфіди, незважаючи на їх різний колір, твердість та інші фізичні властивості, Альберт Великий об'єднав в одну групу під назвою марказитів. Відносячи ту чи іншу речовину до марказитів, вчений робив «спробу на полум'я». При прожарюванні марказитів завжди з'являється характерний різкий запах запаленої сірки ($2PbS + 3O_2 = 2PbO + 2SO_2$). Цікаво, що багато марказитів Альберт здобував синтетично, сполучаючи свинець, залізо та інші метали з сіркою.

Поряд із справжніми алхіміками-вченими у середні віки була безліч шарлатанів, які спекулювали на інтересі до алхімії. За замовленням різних можновладних осіб вони виготовляли алхімічне золото, з якого карбували монети. Замовник був захоплений, алхімік діставав добру винагороду і втікав, поки не виявлялась підробка. Якщо втекти не вдавалось, доля алхіміка була сумна: в'язниця або шибениця.

Наповненням ринку фальшивим золотом «прославились» англійський король Генріх VI, французький король Карл II та ін.

А ось цікава алхімічна історія XVII ст.

У 1648 р. такий собі фон Рутц з Праги перед очима імператора Фердінанда III і його почту, розжарюючи якийсь алхімічний порошок, перетворив його у чисте золото. Захоплення глядачів не можна було описати! Рутца щедро нагородили, а із добутого ним золота було викарбовано медаль з написом: «Божественне перетворення, виконано в Празі 15/I 1648 р. в присутності Його Імп. Вел. Фердінанда III». Ця незвичайна «алхімічна» медаль до цього часу зберігається в одному із західноєвропейських музеїв.

Що ж за чудесний порошок був у руках спритного шарлатана? Це могло бути просто чисте золото, виділене з розчину його солі; воно не блищить і схоже на глину. Або це міг бути коричневий порошок хлорного золота ($AuCl_3$), який при прожарюванні розкладається на золото і хлор.

АЛХІМІЯ ПЕРЕТВОРЮЄТЬСЯ В ЯТРОХІМІЮ

У той час, коли сотні алхіміків намагались добути «філософський камінь», деякі з них цікавились і практичною хімією. Представником алхімії цього напряму вважається легендарний Базіліус Валентінус, католицький монах, що жив у XV ст.

Він насамперед «розвинув» теорію металів (Джабіра), доповнивши її третім елементом — сіллю (принцип твердості). Відповідно до християнської догми про «трійцю» (бог-отець, бог-син, бог — дух святий) кожний метал містить три начала — сіль, сірку і ртуть.

Праці Базіліуса написані дуже туманно і мають наївні рисунки «хімічних реакцій».

Базіліус відкрив новий метал — сурму. Тому що сурма була восьмим за числом металом, якому не вистачало планети на небі, вчені не хотіли визнавати її металом. Очевидно, тому Базіліус називав сурму «видозміною свинцю». Видозміна — не метал і не потребує подруги-планети!

Сурма знайшла широке застосування в медицині. Базіліус почав із захопленням лікувати сурмою і її солями найрізноманітніші хвороби, не звертаючи уваги на отрутність сурм'яних препаратів. Він виготовляв навіть «вічні сурм'яні пілюлі», які, проходячи крізь організм

хворого, справляли свій вплив, а вийшовши назовні, знову вживались для лікування. Базіліус Валентінус запропонував спосіб добування «соляного спирту» (HCl), залізного купоросу, різноманітних солей сурми та ін.

Застосування в медицині сурми і її солей створило новий — «ятрохімічний» — напрям у хімії. За вченням «батька ятрохімії» прославленого лікаря Парацельса (1493—1541), людське тіло складається із сполучення алхімічних елементів — сірки, солі і ртуті, які в здоровому організмі перебувають в гармонічному поєднанні. При порушенні гармонії елементів виникають захворювання, наприклад, надлишок сірки спричиняє гарячку і «моровицю», надлишок ртуті — меланхолію, солі — розлад шлунка і т. д.

Лікувати хвороби потрібно введенням в організм елементів, що їх бракує, у вигляді сірчистих, ртутних препаратів і солі. Лікування неорганічними препаратами замість ліків органічного походження (настої трав, екстракти і т. д.), що вживались, спричинило цілий переворот у медицині. Представники ятрохімії в одній особі поєднували лікаря і хіміка-фармацевта. Ятрохімік шукав і виготовляв лікувальні неорганічні препарати і сам випробовував їх дію на хворих.

Новий напрям відтиснув на задній план алхімічні проблеми і сприяв дальшому розвиткові хімії. Ятрохіміки відкрили багато солей, вперше описали реакцію нейтралізації, розробляли прийоми якісного аналізу, пробуючи ліки «на язик», запропонували першу наївну класифікацію речовин на «мильні і кислі».

В ятрохімічний період вперше було звернуто увагу на існування «повітроподібних речовин, відмінних за своїми властивостями від повітря». Прославлений ятрохімік Ван-Гельмонт (1577—1644) назвав їх газами (від слова «хаос» — безформна матерія). У трактатах ученого згадується «лісовий газ» (CO_2), отрутний «вугільний» (суміш CO і CO_2), «гази, що горять» (CH_4 і H_2). Розрізняючи гази, Ван-Гельмонт не вивчив докладно жодного з них — цьому заважала впевненість у тому, що гази «не можна вміщувати в посудину». Ван-Гельмонта називають «батьком пневматохімії» (хімії газів), до якої вчені звернулись лише через століття.

У той час як ятрохіміки готували ліки, а алхіміки продовжували свої марні шукання «філософського каменя», працювали ще й хіміки-виробничники. Серед них у XVI ст. виділявся славетний Агрікола (1494—1555), лікар за освітою, який присвятив усе своє життя вивченню металургії і мінералогії.

Агрікола прославився своїм чудовим підручником з металургії і розробкою аналізу руд і заводських продуктів. Книга Агріколи написана так повно і просто, що протягом двох століть була настільною книгою металургів. Вона була відома Петру I, її вивчав Ломоносов.

Інший видатний хімік-виробничник — Іоганн Глаубер (1604—1668). Він не був вільний від алхімічних забобонів, але вони йому, як і Агріколі, не заважали займатись прикладною хімією.

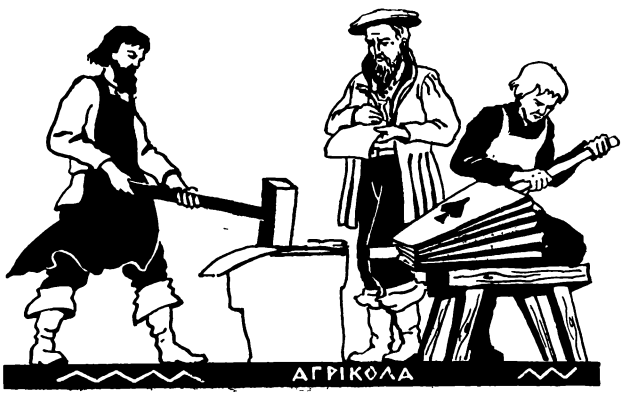
Глаубер розробив спосіб добування соляної кислоти діянням купоросного масла (H_2SO_4) на кам'яну сіль і запропонував використати відходи виробництва — «мірабіліт», названий згодом глауберовою сіллю ($Na_2SO_4 \cdot 10\ H_2O$).

Глаубер дав спосіб добування димлячої азотної кислоти, солей амонію та багатьох інших речовин.

ХІМІЯ СТАЄ НАУКОЮ

Першого нищівного удару алхімії завдано було видатним англійським фізиком і хіміком Робертом Бойлем (1626—1691). Спираючись на досвід, нагромаджений алхіміками, він викрив їх містичні елементи і запропонував вважати за елементи «прості речовини, які, не будучи складеними з інших речовин або одна з одної, є тими складовими частинами, з яких кінець кінцем складаються усі речовини природи».

Завдання хімії і зводиться до встановлення, з яких елементів утворюється кожна складна речовина, і для розв'язання цього завдання Бойль запровадив якісний аналіз. Хімічні елементи Бойля є, таким чином, чимсь відчутним, чимось, що реально існує, виключає мож-



ливість алхімічних перетворень. Праці Бойля і застосований ним метод дослідження шляхом експерименту (вперше проголошений алхіміком Беконом) мали великий вплив на дальший розвиток наукової хімії.

Після Бойля ятрохімічне вчення з його алхімічними елементами людського тіла і надто однобічною хімічною теорією тлумачення захворювань не могло довго тривати. Наприкінці XVII ст. ятрохімія поступилась своїм місцем теорії флогістону.

Теорія флогістону була запропонована Георгом Шталем (1660—1734) для пояснення процесів горіння горючих речовин, перетворення металів у «землі» (окалини) і добування металів з руд. Ці питання надзвичайно цікавили хіміків у зв'язку з швидким розвитком металургії у XVII — XVIII ст.

За теорією флогістону, горючі речовини і метали містять невагому речовину — флогістон.

При горінні вугілля і при прожарюванні металів флогістон видаляється у вигляді полум'я, залишаючи негорючу складову частину — золу (при горінні вугілля) або окалину (при випалюванні металу):

$$\text{вугілля} = \text{флогістон}\uparrow + \text{зола},$$
$$\text{метал} = \text{флогістон}\uparrow + \text{окалина}.$$

Для перетворення окалини в метал, очевидно, потрібно до «землі» приєднати флогістон, тобто прожарити, наприклад, з вугіллям, яке дуже багате на флогістон:

$$\text{окалина} + \text{вугілля (флогістон)} = \text{метал}.$$

Теорія флогістону була першою (але в основі своїй невірною) науковою теорією, яка, спираючись на дослід, пояснювала і узагальнювала цілий ряд явищ.

Досить стрункa і послідовна, вона володіла розумом хіміків ціле століття, але, як усяка хибна теорія, незабаром після своєї появи стала гальмом для розвитку науки. Першим, хто експериментально довів неспроможність теорії флогістону, був геніальний Ломоносов, який за багато років до Лавуазьє прийшов до принципово правильного пояснення явищ горіння і випалювання металів.

У флогістонний період у зв'язку з виявленням особливого інтересу до питань горіння настав час для дослідження повітря і газів. За цю справу взялися талановиті хіміки, серед яких висунулись Кавендіш, Прістлі, Шеєле та інші.

Знайдений був легкий спосіб збирання газів у посудини, наповнені водою або ртуттю («пневматичні ванни»); це дало змогу протягом короткого часу (1772—1776) докладно вивчити найважливіші прості і складні гази. «Пневматохіміки», будучи правовірними «флогістиками», вважали, що до складу всіх газів входить флогістон, а «горюче повітря» (водень), що згоряє без залишку, є чистим флогістоном. (На утворення води при горінні водню не звертали уваги.) Добутий (у 1774 р.) при розжарюванні окису ртуті (HgO) дивовижний газ, «в якому сліпуче яскраво горіла свічка», вважали повітрям, яке не містить флогістону; газ назвали «дефлогістованим повітрям»; інтенсивне горіння в ньому пояснили тією легкістю, з якою флогістон, що виділяється із свічки, яка горить, може поширюватись у повітрі при відсутності в ньому флогістону. Таким чином, історичне відкриття «дефлогістованого повітря» (кисню), «якому судилося повалити всю флогістонну теорію і революціонізувати хімію, пропадало в руках флогістиків даремно» (Енгельс).

Досліди дивовижного горіння різних речовин у дефлогістованому повітрі були повторені «геніальним тлумачем чужих відкриттів» Лавуазьє (1743—1794). Він не був заражений флогістонною теорією, а тому і зміг дати правильне пояснення реакції горіння як реакції сполучення речовини з киснем.

Це пояснення було підтверджене дослідами кількісного характеру. Лавуазьє розкрив таєм-

ницю утворення води при горінні «горючого повітря», якому дав раціональну назву «водень». Вода, що її вважали за елемент, в дійсності виявилась речовиною складною. Після цих та інших чудових відкриттів флогістон, що збивав хіміків з вірного шляху і гальмував розвиток науки, був викинутий за борт. В науку переможно входила нова, правильна киснева теорія горіння Лавуазьє.

Киснева теорія справила повний переворот в основних хімічних поняттях; справді, речовини, які, за флогістонною теорією, вважали за складні (метали, вугілля), в дійсності виявились простими, а прості (окалини) — складними (сполуки металу з киснем) і т. д.

Застосовуючи ваговий метод дослідження, Лавуазьє, подібно до Ломоносова, але на вісімнадцять років пізніше за нього, прийшов до відкриття одного з основних законів природи — закону збереження маси. В науці закон цей назвали іменами обох великих учених — законом Ломоносова — Лавуазьє.

Поява кисневої теорії горіння настійливо вимагала перегляду і зведення в систему усього нагромадженого фактичного матеріалу і розробки раціональної номенклатури.

До Лавуазьє солі, наприклад, називали або за прізвищем хіміка (глауберова, бертолетова і т. д.), або за місцезнаходженням, кольором, смаком (гірка, галун і т. д.). Тому одна і та сама сіль мала кілька різних назв і нерідко таких, які нічого не означали.

У 1787 р. Паризька Академія наук затвердила розроблену академічною комісією нову раціональну номенклатуру. Вона дуже проста і безпосередньо вказує якісний хімічний склад речовини. Це та номенклатура, якою ви користуєтесь, займаючись хімією.

Розробка Лавуазьє вагового методу дослідження скоро дала чудові плоди. В результаті численних кількісних аналізів був відкритий і сформульований закон сталості складу.

Логічним наслідком відкриття закону збереження маси, закону сталості складу, а потім закону кратних відношень була атомістична теорія Дальтона (1766—1844).

Теорія Дальтона була одним з тих багатьох варіантів атомістичного вчення про будову речовин, які пропонували вчені і філософи, починаючи з V ст. до н. е.

Атомістичні теорії, матеріалістичні за своєю природою, а тому спрямовані проти бога, церква проклинала, вони переслідувались світською владою, на час заглушувались, а потім воскресали в оновленому вигляді.

Лавуазьє вперше поставив на ноги хімію, яка в своїй флогістонній формі стояла на голові.

Енгельс

Останньою в часі перед дальтонівською атомістикою була корпускулярна, тобто по-сучасному, атомно-молекулярна, теорія геніального Ломоносова. Хоч вона і була багато в чому глибша за дальтонівську атомістику, але не дістала поширення тільки тому, що час її ще не настав: не вистачало відомостей про кількісний склад складних речовин, не були відкриті основні закони хімії. Атомістична ж теорія Дальтона лише через півстоліття перетворилась у те атомно-молекулярне вчення, що є тепер основною теорією хімії.

З атомістичної теорії, як говорить Енгельс, починається епоха нової хімії.

Нова хімія входила в XIX ст. оснащена атомістичною теорією, основними хімічними законами, ваговим методом дослідження, простою раціональною номенклатурою, доступною і зрозумілою хімічною символікою і очищеною від усіх містичних теорій. Остання з них — теорія «життєвої сили» — після блискучих синтезів органічних речовин з неорганічних здана була до архіву. Поділ хімії на неорганічну (мінеральну) і органічну набув не принципового, а практичного значення.

Швидкий розвиток хімії у найрізноманітніших напрямах привів до виділення великих розділів у ряд самостійних дисциплін. Так,

уже на початку XIX ст. виділилась аналітична хімія. У другій половині XIX ст. розвинулась фізична хімія, основоположником якої можна вважати М. В. Ломоносова.

Теоретичний матеріал фізичної хімії протягом кількох років настільки розрісся, що окремі її галузі в свою чергу розгорнулись у спеціальні «хімії»: електрохімію, термохімію, фотохімію, колоїдну хімію і т. д.

Проникнення хімії майже в усі інші дисципліни привело до появи таких «галузевих хімій», як агрохімія, геохімія, біохімія і т. д.

Тільки саме це перелічення «хімій» свідчить про величезні успіхи хімії у XIX ст. Цими успіхами вона зобов'язана в основному таким справді геніальним відкриттям, як періодичний закон Менделєєва і структурна теорія Бутлерова.

ЛІТОПИС ХІМІЇ

ДЖЕРЕЛА ХІМІЧНИХ ЗНАНЬ

2500—2000 рр. до н. е. Проникнення міді із Сходу в Європу. В південній Вавілонії винайдено терези — знаряддя для вимірювання кількості золота та інших матеріалів. Прообразом для них послужило коромисло носильника важких речей.

2000—1500 Найбільш стародавній, що зберігся, зразок скла, знайдений в одній з єгипетських пірамід.

Найбільш стародавній, що зберігся, зразок ковкого заліза, виявлений у великій піраміді Хеопса.

1300—1000 Герої поем легендарного поета Стародавньої Греції Гомера убираються в лати і б'ються зброєю ще з міді, але серця їх тверді як залізо. З інших металів Гомерові відомі вже олово і свинець; відомо гартування сталі і діяння гною як добрива.

1 ст. до н. е. У матеріалістичній поемі Лукреція Кара «Про природу речей» неіснуючим богам протиставляться невидимі атоми, з допомогою яких пояснюється уся різноманітність явищ навколишнього світу, у тому числі вітри і бурі, поширення запахів, випаровування і конденсація води.

700—1000 н. е. Арабський алхімік Джабір і його послідовники описують хімічні операції і речовини, знайдені алхіміками в процесі їх марних спроб перетворити неблагородні метали в золото: кристалізацію і фільтрування; сірчану, азотну і оцтову кислоти, різні солі.

1000—1200 У «Книзі про терези мудрості», що характеризується як «критерій правильного судження», арабський учений Алказіні наводить питому вагу 50 різних речовин.

1300—1400 В Європі вдруге винайдено порох — першу вибухову речовину, використану людиною. Застосування пороху спричинило революцію у військовій справі. В Китаї порох був винайдений на початку нашої ери.

1452—1519 Великий італійський художник Леонардо да Вінчі, спалюючи свічку під перекинутою над водою посудиною, доводить, що при згорянні повітря витрачається, але не все.

1493—1541 Парацельс перетворює алхімію в ятрохімію. Від нього йде перше спостереження, яке потім багато разів повторювалось, що для горіння потрібне повітря, а метали при перетворенні на окалину збільшують свою вагу.

1600—1650 Ван-Гельмонт відкриває гази. Ван-Гельмонт оголосив терези найпотрібнішим приладом для хіміка і, використовуючи їх, встановив, що метали, які розчинились у кислоті, можна знову виділити з розчину в тій самій кількості.

ЗАРОДЖЕННЯ НАУКОВОЇ ХІМІЇ

1650—1700 У книзі «Хімік-скептик» англійський учений Бойль завдає нищівного удару алхімії і вводить уявлення про хімічний елемент як основне поняття хімії. Бойль створив також основи хімічного аналізу.

1700—1750 Шталь розвиває теорію флогістону.

1756 Ломоносов формулює закон збереження маси і, спираючись на нього, дає правильне пояснення явищам, що відбуваються при випалюванні металів і горінні речовин. Ломоносов формулює атомно-молекулярну теорію і вбачає центральне завдання хімії в дослідженні «внутрішньої нечутливих частинок будови».

1766 Кавендіш відкриває і докладно досліджує водень, виявляючи, зокрема, його надзвичайно малу питому вагу порівняно з повітрям.

1771 Прістлі в числі інших нових газів відкриває кисень і перетворення вуглекислого газу рослинами в повітря, знову придатне для дихання.

1775 Лавуазьє створює кисневу теорію горіння і випалювання металів, тим самим закладаючи фундамент антифлогістичної хімії, і встановлює, що вуглекислий газ — це сполука вуглецю з киснем.

1781 Лавуазьє проводить перші вимірювання кількості тепла, що виділяється при хімічних реакціях (горіння) з допомогою винайденого ним льодяного калориметра.

1783 Лавуазьє остаточно відкидає теорію флогістону і завершує кисневу теорію горіння і випалювання, довівши, що вода являє собою сполуку водню з киснем. Водночас, виконуючи доручення Академії про «удосконалення повітроплавальних машин», він знаходить дешевий спосіб добування для них водню з водяної пари пропусканням пари крізь розжарені залізні стружки.

1783 Перший підйом наповненої воднем повітряної кулі.

1787 Лавуазьє створює сучасну хімічну мову.

1790 Російський академік Т. Е. Ловіц, спираючись на теорію флогістону, відкриває явище вбирання (адсорбцію) вугіллям розчинених речовин.

УТВЕРДЖЕННЯ В ХІМІЇ АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНОГО ВЧЕННЯ

1801—1808 Семирічна суперечка між Бертолле і Прустом з питання: однаковий чи мінливий ваговий склад різних зразків однієї і тієї самої речовини. Суперечка закінчилась перемогою Пруста — утвердженням його закону сталості складу, якому автор дає містичне витлумачення: «Ми повинні вбачати невидиму руку, яка зберігає баланс в утворенні сполук, природа ніколи не творить їх інакше, як з терезами в руках».

1803—1804 Розвиваючи атомно-молекулярне вчення, Дальтон вводить у хімію поняття про атомну вагу хімічних елементів і публікує першу таблицю атомної ваги, обчисленої з вагового складу хімічних сполук, зриваючи завісу таємничості із закону сталості складу. «Вчення про сталість складу здається містичним, якщо ми не визнаємо атомної гіпотези» (Дальтон).

1805—1808 Вивчаючи об'ємні співвідношення, в яких реагують гази, Гей-Люссак встановлює закон об'ємних відношень: при хімічних реакціях між газами об'єми газів, що витрачаються і утворюються (кожного окремо), відносяться, як прості цілі числа.

1811 Авогадро формулює гіпотезу: в рівних об'ємах різних газів при однакових умовах міститься однакове число молекул. З допомогою цієї гіпотези він пояснює числовий матеріал (об'ємні співвідношення) Гей-Люссака, але при умові, що молекули таких газів, як водень, кисень, азот, хлор, вважаються складеними з двох атомів. Але ця гіпотеза відкидається його сучасниками на чолі з Берцеліусом.

1812 Берцеліус висуває гіпотезу про наявність в атомів електричних зарядів: позитивних — у атомів водню і металів, негативних — у атомів інших неметалів. З допомогою цієї гіпотези він пояснює електроліз і утворення хімічних сполук. Гіпотеза Берцеліуса виключає зчеплення одного з одним однакових атомів, внаслідок чого вона не сумісна з гіпотезою Авогадро.

1814 Виступаючи визнаним спадкоємцем Дальтона, Берцеліус публікує нову таблицю атомної ваги 46 вже відомих хімічних елементів і дані про склад 2000 сполук і вводить хімічну символіку, що спирається на атомно-молекулярну теорію. Але безперечного способу обчислення атомної ваги він не знаходить, і це породжує з часом дедалі більші суперечності між послідовниками хімічної атомістики, що переростають у невір'я в пізнаванність атомів.

1817—1829 Доберейнер групує відомі хімічні елементи по трійках у природні групи — «тріади» і формулює закон тріад: атомна вага проміжного за хімічними властивостями елементу кожної тріади дорівнює середньому арифметичному з атомної ваги крайніх елементів.

1822 Велер відкриває перший випадок ізомерії — існування кількох речовин з одним і тим же складом молекули. Це явище було передбачене в атомістиці Ломоносова, але виключалось атомістикою Дальтона.

1828 Велер випадково синтезує першу органічну речовину — сечовину. Це розвіяло переконання в тому, що органічні речовини можуть виникати лише в живих організмах під впливом таємничої життєвої сили, і відкрило тим самим можливість змагання з природою у створенні органічних речовин. Але це тільки перші готування до вторгнення хімії у світ органічних сполук. «Органічна хімія може тепер кого завгодно звести з розуму... вона здається дрімучим лісом, сповненим чудесних

речей, величезною хащею без виходу, без кінця, куди не насмілюєшся проникнути» (Велер).

1834 Дюма виявляє, що при вибілюванні хлором свічок водень у воску частково заміщується хлором. Це — перший удар по електрохімічній теорії Берцеліуса, тому що, за Берцеліусом, атоми хлору і водню заряджені різнойменними зарядами і заміщувати один одного не повинні.

1848 Пастер відкриває новий вид ізомерії — оптичну ізомерію.

1852 Франкланд формулює нову властивість атомів — валентність.

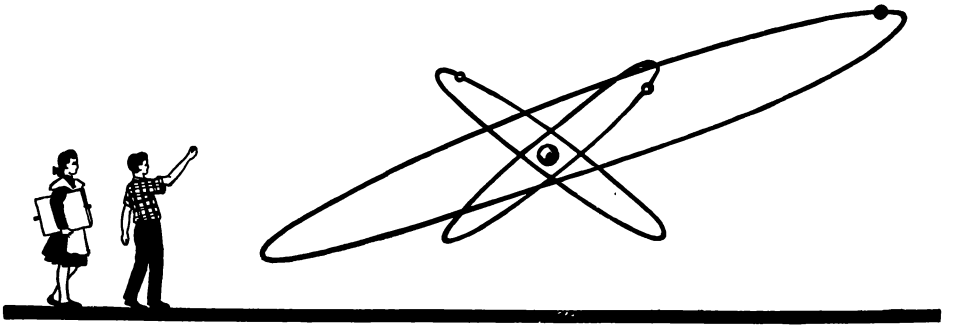
1857 Кекуле встановлює чотиривалентність вуглецю і наявність в органічних сполуках ланцюжків із зчеплених один з одним атомів вуглецю. В результаті електрохімічна теорія Берцеліуса остаточно руйнується. Але можливість встановлення структури молекул Кекуле заперечує.

1860 Перший всесвітній з'їзд хіміків, на якому захисники хімічної атомістики у гострій боротьбі з її противниками здобувають перемогу. Вихід з кризи знайдено у вигляді першого безперечного методу визначення атомної ваги, основаного на гіпотезі Авогадро, що воскресла з мороку забуття. «У 50-х роках одні вважали, що атомна вага кисню дорівнює 8, інші — 16. Смута, плутаність панували. У 1860 р. хіміки всього світу зібрались у Карлсруе для того, щоб досягти погодження, одноманітності. Будучи присутнім на цьому конгресі, я добре пам'ятаю, яка велика була розбіжність і як тоді послідовники Жерара гаряче проводили наслідки закону Авогадро. Істина, у вигляді закону Авогадро — Жерара, з допомогою конгресу, дістала ширше розповсюдження і незабаром підкорила усі розуми. Тоді сама собою зміцнилась нова атомна вага, і вже з 70-х років вона ввійшла у загальний вжиток» (Менделєєв).

1861 Бутлеров створює структурну теорію органічних сполук, пояснює явище ізомерії і відкриває шлях до планомірного створення органічних сполук, йдучи яким органічна хімія починає здобувати одну перемогу за одною у змаганні з природою за створення матеріальних цінностей для задоволення потреб людей.

1869 Шукання зв'язку між хімічними властивостями елементів і їх атомною вагою, що відновились після конгресу в Карлсруе, приводять до найбільшого після самої атомістики узагальнення хімії — відкриття Менделєєвим періодичного закону, який відкриває шлях передбачення і планомірних шукань ще не відкритих хімічних елементів і нових хімічних сполук.

1875 Був відкритий перший з передбачених Менделєєвим хімічних елементів — галій.



Атоми — цеглини Всесвіту

ПЕРІОДИЧНИЙ ЗАКОН Д. І. МЕНДЕЛЄЄВА

В історії розвитку людського знання відомо багато великих подвигів. Але дуже небагато з них можна порівняти з тим, що зробив Дмитро Іванович Менделєєв — один з найбільших геніїв світу. Науковий подвиг Менделєєва не має собі рівних, і значення його не тільки не стирається невблаганним часом, а дедалі зростає і зростає. І ніхто поки що не може сказати, коли до кінця буде вичерпано увесь зміст одного з найбільших у науці узагальнень — періодичного закону Менделєєва.

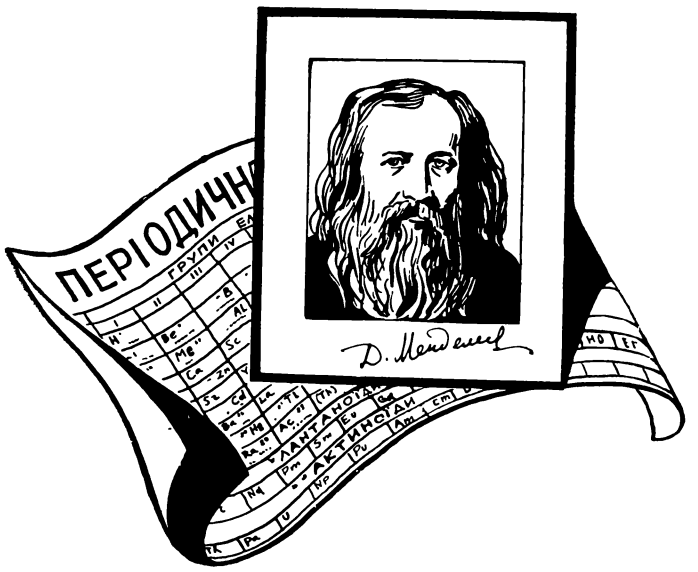
ВІДКРИТТЯ ВЕЛИКОГО ЗАКОНУ

Початок періодичного закону був дуже скромний: 17 лютого 1869 р., збираючись у дорогу, професор Петербурзького університету Дмитро Іванович Менделєєв на звороті листа, в якому його просили приїхати і допомогти виробництву, записав уперше начерк таблиці хімічних елементів.

У цій таблиці зроблено було спробу розташувати елементи в порядку зростання їх атомної ваги і намічено періодичну повторюваність їх властивостей.

Цей день повинен бути відзначений в історії науки як початок нової ери. Це день, коли зародились найсміливіші передбачення про існування у Всесвіті нових, нікому не відомих елементів. Від нього починаються джерела наших знань про атом і його будову, які, розвиваючись, привели у наші дні людство до оволодіння атомною енергією.

У цей день Менделєєв відклав свою подорож. Він записав на окремих картках усі відомі тоді хімічні елементи з їх найбільш важливими



хімічними і фізичними властивостями. Розташовуючи картки в різному порядку, зважаючи на їх хімічні властивості і властивості їх сполук, він склав свій перший варіант природної системи хімічних елементів.

Ось що, за словами самого Менделєєва, він зробив у цей день: «Мимоволі зародилася думка про те, що між масою і хімічними елементами конче повинен бути зв'язок. А тому що маса речовини, хоч і не абсолютна, а лише відносна, виражається остаточно у вазі всіх атомів, то потрібно шукати функціональної відповідності між індивідуальними властивостями елементів і їх атомною вагою. Шукати ж що-небудь, хоч би гриби, або яку-небудь залежність, не можна інакше, як дивлячись і пробуючи. Ось я і почав підбирати, написавши на окремих картках елементи з їх атомною вагою і корінними властивостями, схожі елементи і близьку атомну вагу, що швидко і привело до того висновку, що властивості елементів стоять у періодичній залежності від їх атомної ваги, причому, маючи сумнів у багатьох неясностях, я ні хвилини не сумнівався в загальності зробленого висновку, тому що випадковості допустити було неможливо».

З цього дня Дмитро Іванович залишив усі інші заняття. Він з величезною напругою віддався тільки роботі над періодичним законом. 1 березня 1869 р. він розіслав багатьом ученим в Росії і за кордоном невеликий аркушик, що містив перший варіант періодичної системи — «Спробу системи елементів», передав своєму другові проф. М. О. Меншуткіну доповідь під назвою «Співвідношення властивостей з атомною вагою елементів» і, нарешті, виїхав на завод.

Вперше повідомлення про найбільше відкриття зроблено було на засіданні Російського хімічного товариства 6 березня. Замість автора доповідь його прочитав Меншуткін. У протоколі засідання Російського хімічного товариства від 6 березня 1869 р. з'явився короткий сухий запис:

«М. Меншуткін повідомляє від імені Д. Менделєєва про спробу системи елементів, основану на їх атомній вазі і хімічній схожості. Через відсутність Д. Менделєєва обміркування цього повідомлення відкладено до наступного засідання...»

Цей байдужий протокол відбив ставлення вчених-сучасників, які вперше почули про періодичну систему. Вона була для них просто незрозуміла, вони не звернули на неї уваги.

ЯК БУВ ВІДКРИТИЙ ПЕРІОДИЧНИЙ ЗАКОН

Чи справді все було так просто, як розповідає Менделєєв? На перший погляд здається, що немає нічого важкого в тому, щоб, написавши на окремих картках назви елементів, їх атомну вагу і їх властивості, розташувати їх по порядку. Адже з усіх можливих способів, якими тільки можна було комбінувати ці картки, розташування в ряд за зростанням атомної ваги, починаючи з елементу з найменшою вагою, — найпростіше... Це — перше, що кожному може прийти в голову. Помітити ж закономірність у зміні властивостей правильно розташованих елементів не так уже й важко. Бо ж ці властивості і в часи Менделєєва були добре відомі.

У чому ж заслуга Менделєєва?

Забудьте на деякий час усе, що ви вже знаєте з хімії, все, що ви встигли пізнати в школі про періодичну систему, уявіть, що ви перенеслись в середину минулого століття і знаєте тільки те, що знали хіміки — сучасники Менделєєва.

До цього часу було відкрито і вивчено шістдесят три хімічні елементи (отже, більш як тридцять ще були невідомі).

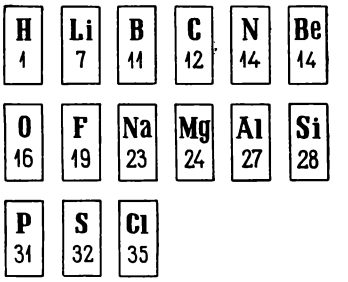
Були знайдені способи визначення атомної ваги, але робили це з недостатньою точністю і далеко не для всіх елементів правильно. Тоді це було ще дуже важке завдання.

Так, атомна вага у дев'яти елементів була визначена невірно, причому тоді цього, звичайно, ніхто не підозрював. Отже, приблизно з дев'яти десятків елементів, що існували в природі, хіміки більш або менш добре вивчили близько п'ятдесяти.

Як би повинен був розташувати свої картки Менделєєв?

Найменшу атомну вагу має водень (H). Вона дорівнює одиниці. Другим у той час був літій (Li). Його атомна вага — близько 7. За ним йшов бор (B) з атомною вагою близько 11, вуглець (C) з атомною вагою 12, азот (N) з атомною вагою 14, берилій (Be) з атомною вагою теж 14, далі кисень (O) — 16, фтор (F) — 19 і т. д.

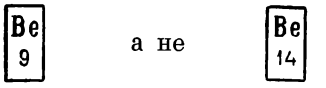
Отже, картки з елементами, якби їх розташувати за зростанням атомної ваги, повинні були б становити ось такий ряд на початку таблиці:



На цих картках написано округлену атомну вагу з такою точністю, з якою вона була відома в той час.

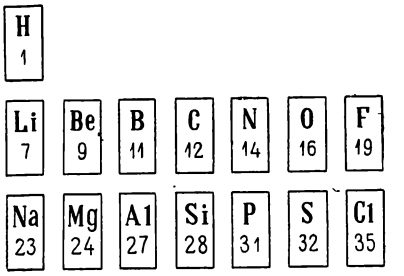
А як розташував свої картки з елементами Менделєєв?

Вмістивши під воднем літій, він поряд з літієм... поклав картку, на якій було написано:



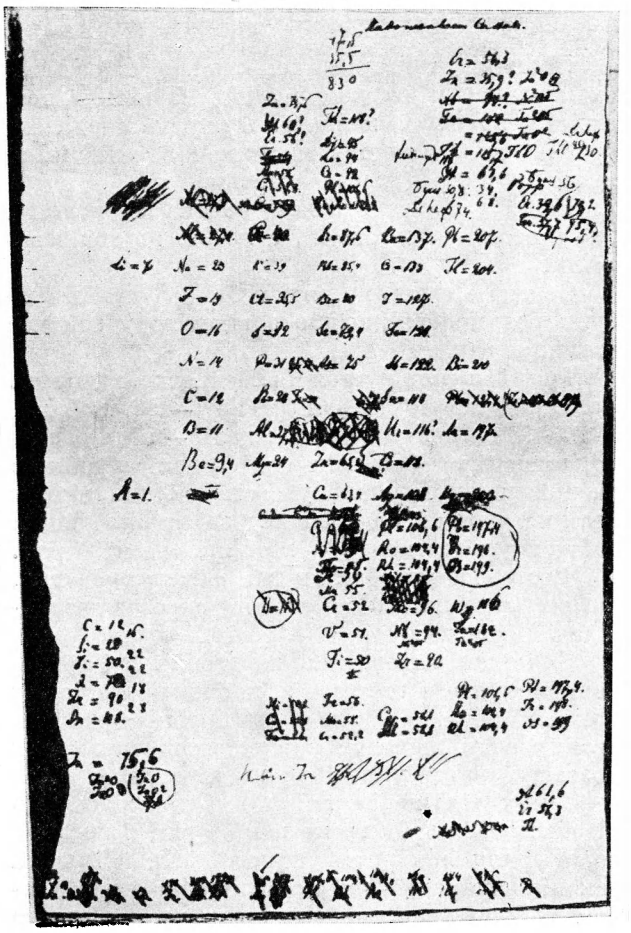
Але ж у ті часи кожний хімік добре знав, що атомна вага берилію — 14. Чому ж Менделєєв, не проводячи ніяких досліджень щодо визначення атомної ваги цього металу, сміливо змінив її?

Ось як він розташував картки на початку таблиці:

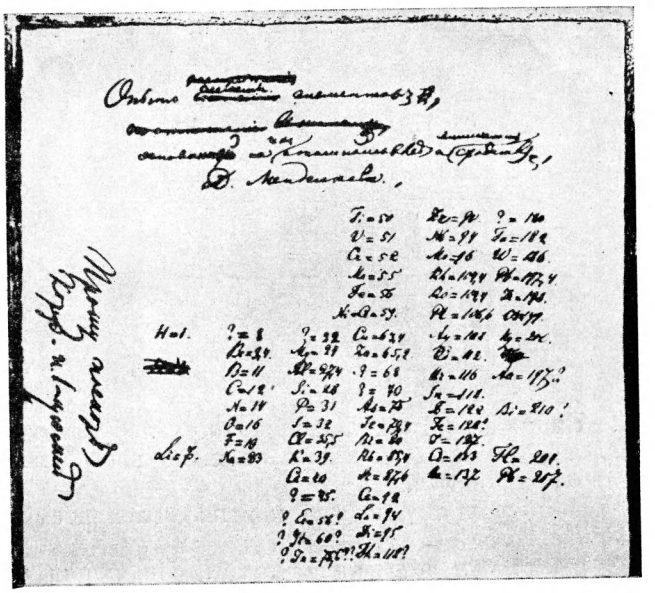


При такому розташуванні один під одним виявились хімічно схожі елементи. Метал літій схожий на метал натрій: обидва м'які, легко ріжуться ножем, бурхливо реагують з водою, утворюючи луги.

Берилій і магній схожі один з одним. Фтор має багато спільного з хлором — це їдкі задушливі гази, які утворюють з металами цілком схожі сполуки.



Перший власноручний начерк періодичної системи елементів, зроблений Д. І. Менделєєвим 17 лютого 1869 р.



З цього рукопису вперше було вроблено друкарський набір першої в світі менделєєвської таблиці хімічних елементів.

При такому розташуванні цілком чітко виявляється періодичність у властивостях елементів. У двох перших коротких періодах менделєєвської таблиці правильно чергуються елементи з аналогічними властивостями.

Але як же все-таки вони були побудовані Менделєєвим? Мабуть, він був неправий, коли твердив, що розташував елементи за їх атомною вагою. Якби він справді розташував їх за зростанням тієї атомної ваги, яка була відома науці у ті часи, то ніякого періодичного закону виявити було б неможливо навіть у перших рядах таблиці.

Адже ж Менделєєв передбачив на підставі періодичного закону правильну атомну вагу берилію. Пізніші дослідження підтвердили це передбачення.

Продовжимо побудову ще одного ряду таблиці після хлору. Ось елементи і їх атомна вага, відома в середині минулого століття: калій (K) — 39, кальцій (Ca) — 40, ванадій (V) — 51, хром (Cr) — 52, титан (Ti) —52, марганець (Mn) — 55.

Відповідно до значення відомої у ті часи атомної ваги слід було б чекати такого чергування карток після хлору:

K	Ca	V	Cr	Ti	Mn
39	40	51	52	52	55

ТАЄМНИЦЯ ПОРОЖНЬОГО МІСЦЯ

Але, продовжуючи побудову своєї таблиці, Менделєєв розмістив картки з елементами зовсім не так.

Ось як він їх розташував:

H						
1						
Li	Be	B	C	N	O	F
7	9	11	12	14	16	19
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl
23	24	27	28	31	32	35
K	Ca	?	Ti	V	Cr	Mn
39	40		48	51	52	55

Під карткою натрію опинилась картка з дуже схожим на нього калієм; під магнієм — теж схожий на нього кальцій. А потім Менделєєв зробив дивовижний вчинок: під алюмінієм вміщено порожню картку.

Вслід за порожньою — картка з титаном, але з атомною вагою 48, а не 52, як тоді вважали.

Отже, і в третьому ряді таблиці елементи не були розташовані, згідно з відомою у той час атомною вагою.

Третій період у таблиці Менделєєва довгий. За марганцем ідуть залізо (Fe) — 56, кобальт (Co) — 59, нікель (Ni) — 59; далі — мідь (Cu) — 63, цинк (Zn) — 65. Але ось слідом за цинком вчений знову залишив у своїй таблиці підряд два порожніх місця, за якими йшли добре відомі елементи — миш'як, селен і бром.

З того, що ми розглянули, цілком очевидно, що все було не так просто, як скромно розповідав Менделєєв.

Не можна погодитись, що Менделєєв просто розташовував елементи в порядку зростання атомної ваги. Скоріше навпаки: справжню атомну вагу елементів він встановлював за їх розташуванням у періодичній системі.

Самих тільки фактів, які були відомі до Менделєєва, як би їх не комбінувати, не було досить для відкриття одного з найбільших законів природи — періодичного закону. Потрібне було не тільки знання нагромадженого протягом багатьох віків хімічного досвіду. Потрібно було мати геніальність і особливо тонку інтуїцію, щоб охопити всю неоглядну

сукупність безлічі хімічних явищ і глибоко відчути заховану в них закономірність.

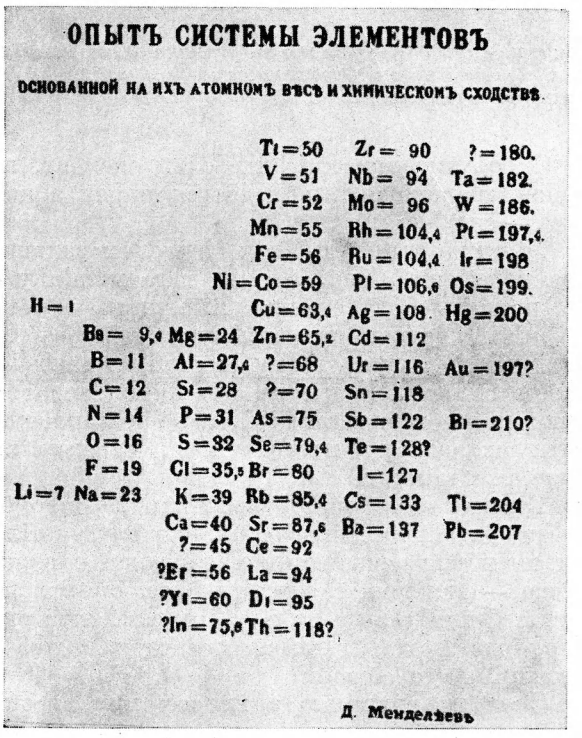
Потрібно було мати особливу революційну сміливість, щоб, усвідомивши цю закономірність, сміливо виправляти старе і передбачати нове в науці, грунтуючись на переконанні у своїй правоті.

ВЕЛИКЕ ПЕРЕДБАЧЕННЯ

Що ж означають порожні місця в таблиці Менделєєва?

Чи це прогалини в природі, і тому хіміки не знайшли елементів, які підходять до цих порожніх кліток таблиці, чи ж це прогалини в людському знанні про природу?

Чи існує, наприклад, у природі елемент, важчий, ніж кальцій, і легший, ніж титан, за атомною вагою і схожий на бор і алюміній за хімічними властивостями?



ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

			Ti=50	Zr= 90	?=180.
			V=51	Nb= 94	Ta=182.
			Cr=52	Mo= 96	W=186.
			Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,4.
			Fe=56	Ru=104,4	Ir=198
			Ni=Co=59	Pl=106,6	Os=199.
H=1			Cu=63,4	Ag=108	Hg=200
	Be= 9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112	
	B=11	Al=27,4	?=68	Ur=116	Au=197?
	C=12	Si=28	?=70	Sn=118	
	N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?
	O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?	
	F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127	
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204
		Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207
		?=45	Ce=92		
		?Er=56	La=94		
		?Yt=60	Di=95		
		?In=75,6	Th=118?		

Д. Менделѣевъ

«Перші думки про періодичність вкладені мною в аркушик... який 1-го березня 1869 року був надісланий мною багатьом ученим» (Менделєєв). Це перша таблиця періодичної системи елементів. Вона далеко ще не закінчена. У неї незвичайна і незручна форма. В ній ще можна помітити багато неточностей. Варте уваги те, що вже у цій самій першій таблиці залишені і відмічені знаком питання п о р о ж н і місця.

У Менделєєва сумнівів не було. Кожне місце в таблиці відповідає певному хімічному елементу, який повинен обов'язково існувати.

У 1871 р. в журналі Російського хімічного товариства з'явилась велика праця Менделєєва. Вона називалась «Природна система елементів і застосування її до визначення властивостей невідкритих елементів».

Навряд чи в світовій науковій літературі будь-коли опублікована була стаття, схожа на цю! У ній Менделєєв описує три ніким, ніколи і ніде в світі не бачені хімічні елементи, причому описує їх так грунтовно, як не зміг би це зробити інший учений-дослідник, який тримав у руках їх сполуки і присвятив довгі роки експериментальному дослідженню їх в лабораторії.

Яким же шляхом періодичний закон дає змогу описувати невідоме? Яким чином місце в таблиці визначає властивості елементу?

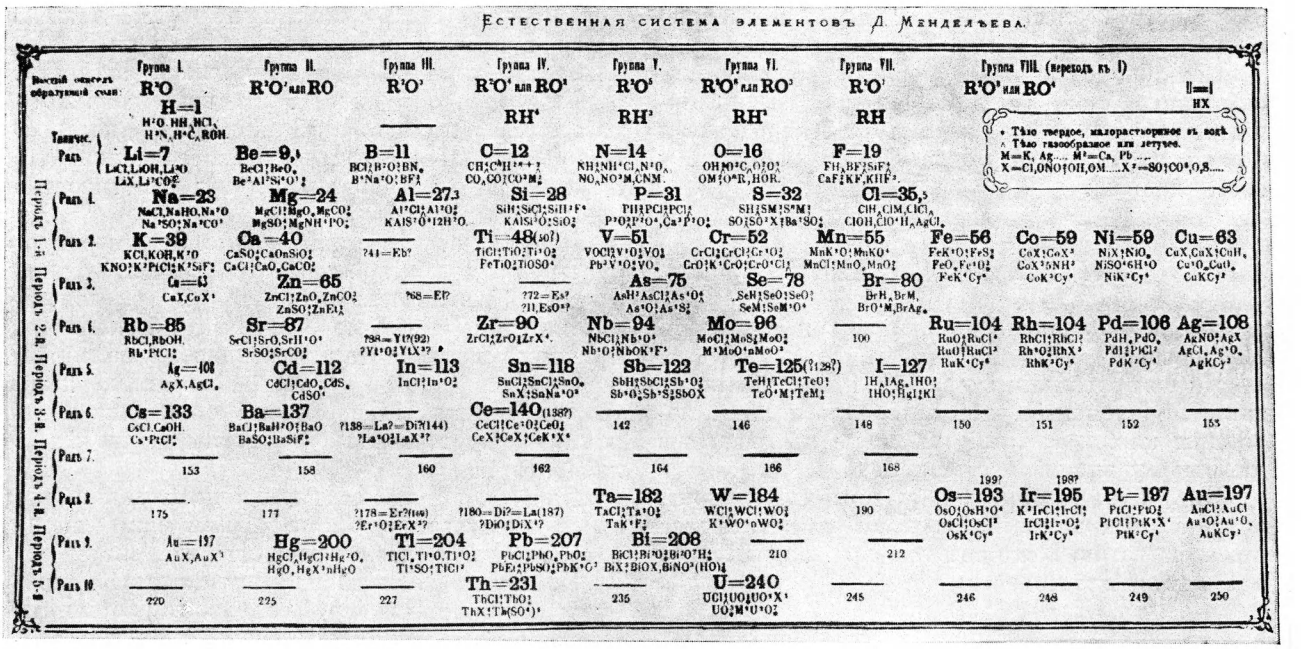
Найкраще це можна зрозуміти, якщо спробувати, за прикладом Менделєєва, порівняти властивості елементу порожньої клітки з властивостями його сусідів.

Виділимо з таблиці ту частину, яка включає порожні місця і елементи, що їх оточують.

	I	III	IV	V
2	Be 9	B 11	C 12	N 14
3	Mg 24	Al 27	Si 28	P 31
4	Ca 40	?	Ti 48	V 51
	Zn 65	?	?	As 75
5	Sr 88	Y 89	Zr 91	Nb 94
	Cd 112	In 114	Sn 119	Sb 120

Порожня клітка між кальцієм і титаном знаходиться на початку четвертого періоду, а дві порожні клітки, розташовані поряд між цинком (Zn) і миш'яком (As), знаходяться в кінці цього періоду.

Гіпотетичний (гаданий — від слова «гіпотеза») елемент, який повинен був займати перше порожнє місце, Менделєєв назвав екабором. У таблиці він іде за кальцієм. Той елемент, який



Ця таблиця була вміщена Дмитром Івановичем у першому виданні його чудового підручника «Основи хімії» (1871). У ній ще дуже багато порожніх місць і зовсім немає нульової групи. Особливо цікаво, що в цій таблиці вже передбачені місця для трансуранових елементів.

повинен зайняти порожнє місце біля цинку, він назвав екаалюмінієм, а сусідній з ним — екасиліцієм.

Порожнє місце екабору знаходиться між кальцієм (атомна вага 40) і титаном (атомна вага 48). Отже, атомна вага екабору повинна бути близька до середнього значення:

$$\frac{40 + 48}{2} = 44.$$

З киснем він повинен давати окис складу, аналогічного окису бору і алюмінію: X_2O_3. Самий екабор повинен бути легким металом, бо ж він стоїть між двома легкими металами — кальцієм і титаном. Густина сусідів екабору по ряду дозволяє визначити і його густину. Для кальцію вона дорівнює 1,6, для титану — 5,2. Тому густина екабору повинна приблизно дорівнювати:

$$\frac{1,6 + 5,2}{2} = 3,4.$$

Екабор повинен мати безбарвні солі, тому що сусіди утворюють безбарвні сполуки.

З розчинів його солей екабор можна осаджувати содою, його вуглекисла сіль буде нерозчинною, тому що його сусіди утворюють нерозчинні вуглекислі солі.

Спробуємо описати і ще один елемент, порожнє місце якого знаходиться поряд з цинком, — екаалюміній.

Між цинком і миш'яком Менделєєв залишив два порожніх місця. Атомна вага миш'яку — 75, цинку — 65. Неважко зміркувати, що екаалюміній повинен мати атомну вагу близько 68. Він міститься у третьому стовпці поряд з металом цинком. У цьому стовпці знаходиться алюміній — теж метал, і екаалюміній повинен бути схожий на нього. Отже, екаалюміній буде теж металом.

Густину його ми б визначили за відомою густиною найближчих сусідів, враховуючи тільки, що поряд з екаалюмінієм є ще одне порожнє місце — екакремній. Густина екаалюмінію повинна бути близька до 6,0. Так само як і екабор, екаалюміній можна осадити содою з розчинів його солей.

Сполуки алюмінію з хлором при високій температурі мають леткість, і хлориста сполука алюмінію теж повинна бути леткою.

Передбачення властивостей екаалюмінію ми могли б продовжити. Але для цього нам потрібно було б знати краще хімію вже відкритих і добре вивчених елементів.

Ось якими словами Менделєєв закінчує опис властивостей екаалюмінію: «Можна сподіва-

тись, що він буде відкритий спектральним дослідженням, подібно до того, як відкриті дальші за ним індій і талій...»

Таким чином, Менделєєв не тільки описав невідоме, але й передбачив, як воно буде пізнане. Але сучасники не поділяли упевненості Менделєєва. Вони прийняли велике відкриття холодно і не змогли його оцінити.

ЯК СПРАВДИЛИСЯ ПЕРЕДБАЧЕННЯ МЕНДЕЛЄЄВА

У 1875 р. увесь світ облетіла звістка: молодий французький учений-спектроскопіст Лекок де Буабодран з мінералу, добутого в Піренейських горах, виділив новий елемент. На слід його Буабодрана навела слабка фіолетова лінія в спектрі мінералу, яку не можна було приписати жодному з відомих хімічних елементів. На честь своєї батьківщини, яка раніше називалась Галлією, Буабодран назвав новий елемент галієм. Галій — дуже рідкий метал, і Буабодранові було дуже важко добути його в кількості, трохи більшій за шпилькову головку. Але Буабодран виявився великим майстром. Він примудрився з цією крупинкою проробити багато цікавих дослідів і докладно описав новий метал: питому вагу галію, температуру плавлення, сполуку з киснем і навіть солі.

Яке ж було здивування Буабодрана, коли через Паризьку Академію наук він одержав листа з російською маркою, в якому повідомлялося: в описі властивостей галію все вірно, крім питомої ваги: галій важчий за воду не в 4,7 раза (як твердив Буабодран), а в 5,9 раза.

Невже хтось інший відкрив галій раніше?

Здивований Буабодран заново визначає питому вагу галію, піддавши метал більш старанній очистці. І що ж, виявляється, він помилився, а автор листа — це був, звичайно, Менделєєв, який ніколи не бачив галію в очі, — правий: питома вага галію дорівнює не 4,7, а 5,9.

Незабаром (у 1879 р.) два скандінавські хіміки майже одночасно знайшли новий невідомий елемент у рідкому мінералі гадолініті. Його назвали скандій. Коли ж були досліджені його властивості, то стало цілком очевидно, що це не що інше, як давно відомий, за передбаченнями Менделєєва, екабор.

А через п'ятнадцять років після передбачення Менделєєва (у 1886 р.) німецький хімік Вінклер відкрив ще один новий елемент і назвав його германієм.

На цей раз не довелося Менделєєву самому вказувати, що і цей знову відкритий елемент був ним передбачений раніше.

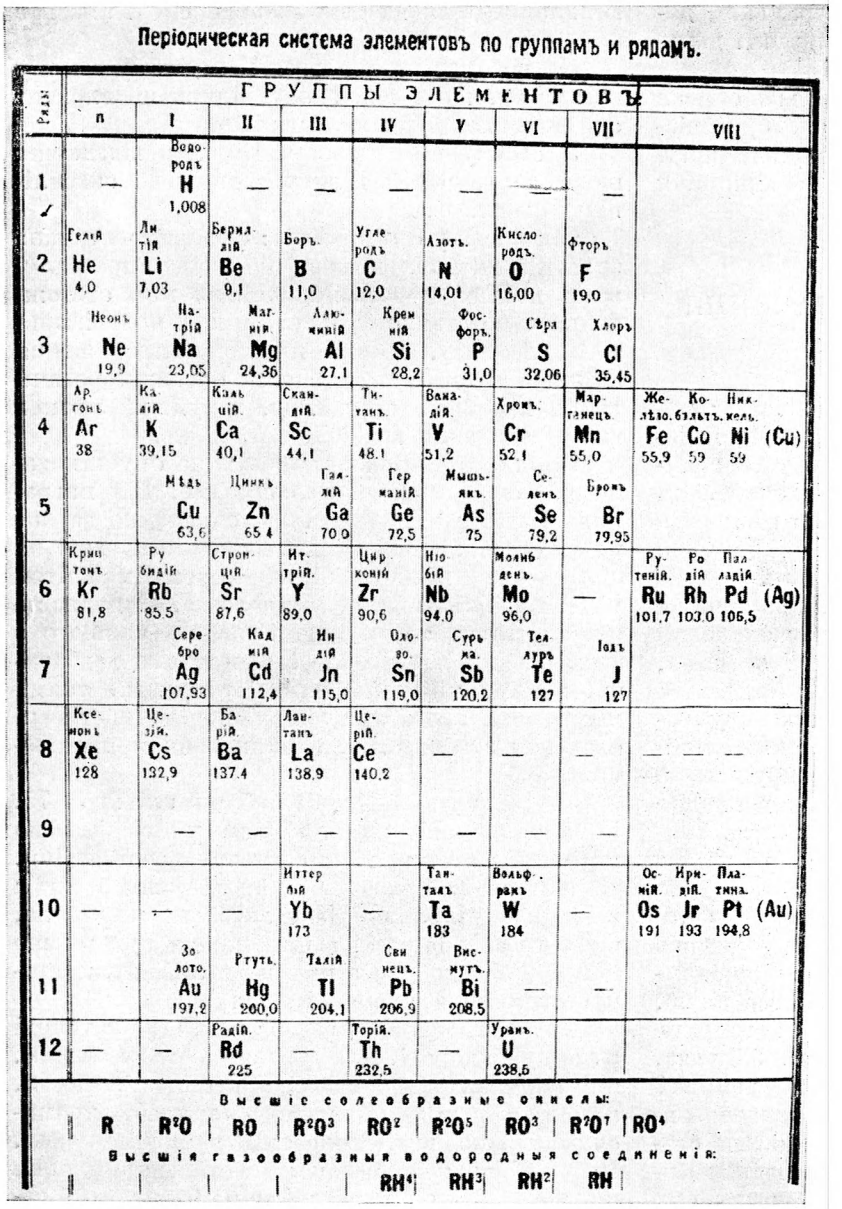
У своєму повідомленні Вінклер відзначив, що його германій цілком відповідає екасиліцію Менделєєва.

Він писав у своїй роботі: «Навряд чи можна знайти інший більш разючий доказ справедливості вчення про періодичність, ніж ототожнення гіпотетичного екасиліцію і нововідкритого елементу. Це не просто підтвердження сміливої теорії, тут ми бачимо очевидне розширення хімічного кругозору, потужний крок в галузі пізнання».

Вінклер не шукав германію за опублікованими Менделєєвим його ознаками. Він натрапив на нього випадково. Виходило, що всі ще не відкриті хімічні елементи немовби взяті на облік — їх стільки, скільки порожніх кліток у періодичній таблиці Менделєєва. Виявилось, що не тільки точно відомі ознаки кожного з них, але навіть заздалегідь можна передбачити, в яких мінералах слід їх шукати, якими хімічними способами потрібно добувати ці елементи з мінералів, в яких вони приховуються.

Знайдіть у періодичній таблиці клітку № 75. Вона тепер вже не порожня: у неї вписано хімічний елемент, що має назву «реній» (Re). Навряд чи цей метал був би відкритий, якби періодична таблиця Менделєєва не підказала, що його слід шукати в платинових рудах і що його можна добути з них у вигляді дуже леткої сполуки з киснем (окислу).

Труднощі були тільки в тому, що платинові руди дуже дорогі. Але тут на допомогу вченим, які вирішили будь-що відкрити новий метал, прийшли вимоги практики — потреби промисловості, яка виробляла електричні лампочки. Вчені з'ясували, що коли метал, який вони шукають, існує в природі, то не буде чого й гадати виготовляти з нього машини, бо цей метал буде надзвичайно дорогий. А втім... подивіться: що за елемент вписано в сусідню клітку, № 74? Це вольфрам, найбільш тугоплавкий з металів. Він не плавиться і майже не випаровується навіть при білому прожарюванні. Ось чому саме з вольфраму виготовляють найтонші, майже невидимі нитки розжарення («волоски») електролампочок, які тепер освітлюють наші будинки замість старовинних чадних скіпок, свічок і гасових ламп. Сотні, тисячі годин служить нам така лампочка, доки «волосок» від



Періодическая система элементовъ по группамъ и рядамъ.

Ряды	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ								
	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	—	Водородъ H 1,008	—	—	—	—	—	—	
2	Гелій He 4,0	Литій Li 7,03	Берилій Be 9,1	Боръ B 11,0	Углеродъ C 12,0	Азотъ N 14,01	Кислородъ O 16,00	Фторъ F 19,0	
3	Неонъ Ne 19,9	Натрій Na 23,05	Магній Mg 24,36	Алюминій Al 27,1	Кремній Si 28,2	Фосфоръ P 31,0	Сѣра S 32,06	Хлоръ Cl 35,45	
4	Аргонъ Ar 38	Калій K 39,15	Кальцій Ca 40,1	Скандій Sc 44,1	Титанъ Ti 48,1	Ванадій V 51,2	Хромъ Cr 52,1	Марганецъ Mn 55,0	Желѣзо Fe 55,9 / Кобальтъ Co 59 / Никкель Ni 59 / (Cu)
5		Мѣдь Cu 63,6	Цинкъ Zn 65,4	Галлій Ga 70,0	Германій Ge 72,5	Мышьякъ As 75	Селенъ Se 79,2	Бромъ Br 79,95	
6	Криптонъ Kr 81,8	Рубидій Rb 85,5	Стронцій Sr 87,6	Итрій Y 89,0	Цирконій Zr 90,6	Ніобій Nb 94,0	Молибденъ Mo 96,0	—	Рутеній Ru 101,7 / Родій Rh 103,0 / Палладій Pd 106,5 / (Ag)
7		Серебро Ag 107,93	Кадмій Cd 112,4	Индій In 115,0	Олово Sn 119,0	Сурьма Sb 120,2	Теллуръ Te 127	Іодъ J 127	
8	Ксенонъ Xe 128	Цезій Cs 132,9	Барій Ba 137,4	Лантанъ La 138,9	Церій Ce 140,2	—	—	—	— — —
9		—	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	—	Иттербій Yb 173	—	Танталъ Ta 183	Вольфрамъ W 184	—	Осмій Os 191 / Иридій Jr 193 / Платина Pt 194,8 / (Au)
11		Золото Au 197,2	Ртуть Hg 200,0	Таллій Tl 204,1	Свинецъ Pb 206,9	Висмутъ Bi 208,5	—	—	
12	—	—	Радій Rd 225	—	Торій Th 232,5	—	Уранъ U 238,5		
	Высшіе солеобразные оксилы:	R	R^2O	RO	R^2O^3	RO^2	R^2O^5	RO^3	R^2O^7	RO^4
	Высшія газообразныя водородныя соединенія:					RH^4	RH^3	RH^2	RH	

Порівняйте періодичну таблицю, прикладену до восьмого видання «Основ хімії» (1906), з тим варіантом таблиці, який був вміщений у першому виданні. На порожніх раніше місцях знаходяться вже нові елементи, відкриті точно у відповідності з передбаченнями великого вченого. Додана і нова, нульова, група. Елементи, що знаходяться в ній, теж були відкриті за методом Менделєєва.

постійного сильного розжарювання не порветься: лампочка «перегоріла».

Раніше ніж «волоски» електролампочок почали виготовляти з вольфраму, вони виготовлялись з металу осмію (№ 76).

Тепер вам зрозуміло, у чому справа, чому для виробництва електролампочок дуже важливо було знайти цей ще не відкритий метал.

Він повинен був зайняти місце в таблиці між осмієм і вольфрамом. Можливо, отже, що новий метал теж здасться для виготовлення ниток розжарення. А чи багато металу витрачається на ці майже невидимі, майже невагомі нитки? Нічого, якщо метал буде трохи дорогий; хай тільки нитка довше не перегоряє.

Елемент № 75 (реній), існування якого було передбачене Менделєєвим (він назвав його двімарганець), таким чином був відкритий ученими. Для ниток розжарення він виявився дуже придатним металом.

ВЕЛИКЕ ВИПРОБУВАННЯ ПЕРІОДИЧНОГО ЗАКОНУ

На невеликому клаптику паперу в 1869 р. Менделєєв накреслив табличку елементів з непарною і парною валентністю. Він позначив на ній елементи, що їх бракує, з атомною вагою 20 і 36 і поставив біля кожного виразні знаки питання. Таких елементів у той час відомо не було.

Працюючи над розвитком періодичної таблиці, він не залишив у ній місця для цих елементів і ніколи, принаймні прилюдно, до них більше не повертався. Цей аркушик залишився невикористаним в архіві вченого.

Роком раніше на засіданні Паризької Академії наук 26 жовтня 1868 р. були прочитані один за одним два листи.

Один був надісланий з Індії, від астронома Жансена, другий — з Англії, від астронома Лок'єра. Обидва вони повідомляли, що в спектрі сонячних протуберанців вони (незалежно один від одного) виявили нову жовту лінію, яка не може належати ні одному хімічному елементові з тих, що існують на земній кулі.

На честь цього дивовижного збігу вражена Академія навіть виготувала золоту медаль з портретами обох учених на одному боці і зображенням бога сонця Аполлона на другому.

Вирішено було, що нова лінія у спектрі належить якомусь особливому «небесному» елементу.

Він був названий ім'ям Сонця — гелій.

Через двадцять п'ять років після відкриття гелію на Сонці славетний англійський фізик Релей виявив дуже дивний факт: літр чистого азоту, добутого з повітря, важчий, ніж літр того ж азоту, добутого з будь-якої азотної сполуки. Різниця була мізерна — тисячні частки грама, але вона була.

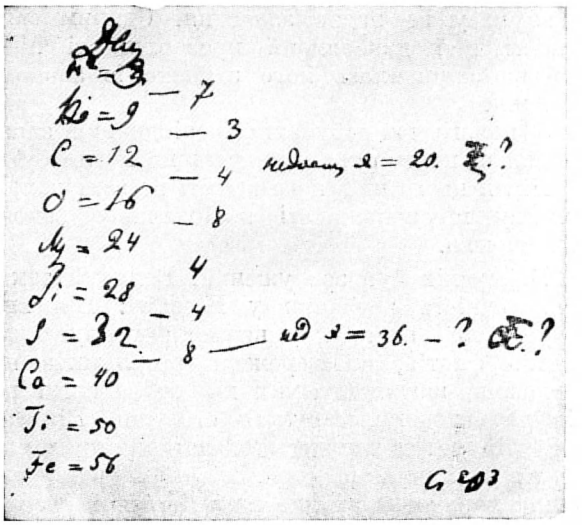
Релей написав про це листа до лондонського журналу «Природа». У листі він запитував, чи не зуміє хтось з читачів журналу пояснити, чому «повітряний» азот важчий. Але відповідей не надійшло. Тоді Релей звернувся по допомогу до свого друга — відомого хіміка Рамзая, і вони вирішили, що кожний з них не залишить своєї лабораторії до того часу, поки загадка не буде розгадана. Вони працювали різними методами і, нарешті, знайшли, що в звичайному повітрі є якась домішка — і чимала: у кожному літрі повітря міститься близько десяти кубічних сантиметрів нового, невідомого газу. Вони дали йому ім'я «аргон». Дивовижний це був газ. Подібних речовин хіміки ще не знали. Ніякими засобами не можна було примусити його вступати в хімічні реакції. Він не сполучався ні з чим. Це і було відбито в його назві: у перекладі з грецької «аргон» означає «лінивий».

Аргон виявився новим хімічним елементом. Потім Рамзай дізнався, що відомий геолог Гільдебрант спостерігав деякі мінерали, що містять уран або торій, які при нагріванні виділяють якийсь негорючий газ. Рамзай вирішив перевірити, чи це не аргон.

Але виявилось, що газ, який виділився з мінералу клевеїту, не є аргоном. У нього був зовсім інший спектр, відмінний від уже дослідженого спектра аргону. Рамзай дав йому ім'я «криптон» («таємний») і надіслав запаяну пробірку з криптоном одному з досвідчених спектроскопістів — Круксу для точного дослідження спектра.

У відповідь він одержав телеграму: «Криптон — це гелій. Прийдіть і подивіться. Крукс».

Таким чином газ, вперше за чверть століття до цього знайдений на Сонці, був, нарешті, виявлений на землі. Гелій виявився найбільш легким газом після водню.



Цей аркушик знайдено в архіві Менделєєва. На ньому ясно видно вказівки на елементи майбутньої нульової групи, що їх бракує. Більш як за двадцять років до відкриття благородних газів великий учений вже передбачав їх існування.

Але періодичний закон не передбачав існування таких хімічних елементів, як гелій і аргон. Для них у періодичній системі не було порожніх кліток. Куди вмістити нові елементи?

Скептики знову піднеслися духом, знову зазвучали голоси тих, що мали сумнів у періодичній системі і періодичному законі. Але це тривало недовго.

У 1897 р. Рамзай прочитав доповідь, яку він назвав так: «Ще не відкритий газ». Рамзай сказав: «За зразком нашого вчителя Менделєєва я описав, наскільки можливо було, очікувані і гадані співвідношення газоподібного елементу, який повинен був би заповнити прогалину між гелієм і аргоном».

Місця для гелію і аргону в менделєєвській таблиці знайшов Рамзай. Вони були вміщені в новий, нульовий, стовпець між сьомим, де були фтор і хлор, і першим, де розмістились метали, подібні до літію і калію.

Звідси виходило, що повинен існувати газ, такий самий інертний, як аргон, але легший за нього, з атомною вагою 20.

Керуючись передбаченими властивостями, Рамзай почав шукати новий газ і знайшов його в рідкому повітрі. Цей газ дістав назву «неон», що означає «новий», а незабаром знайдено було і решту елементів нової групи: криптон, ксенон і потім радон.

Так через тридцять років справдився побіжний здогад геніального вченого, якому він сам

свого часу не надав значення. Єдиним свідченням цієї дивовижної прозорливості Менделєєва залишилась його записка із знаками питання.

З нового випробування періодичний закон вийшов з перемогою. Інакше і не могло бути!

Після цього ні в кого в світі не залишалось сумніву в справжності періодичного закону Менделєєва.

Цей успіх був заслужений. Великий закон довів єдність речовини у Всесвіті. Він вніс стрункість і порядок у неймовірну плутанину безлічі фактів, спостережень, результатів вимірювань, нагромаджених хімією за сотні років до середини минулого століття. Він дав могутній метод для дослідження хімічних елементів і їх властивостей. Самим Менделєєвим була виправлена атомна вага багатьох елементів, відомих раніше, в тому числі, наприклад, урану. Періодичний закон дав можливість передбачати нове — це справжній закон природи.

Але не все було ясне в періодичному законі в часи Менделєєва. Були непояснені винятки: виявилось, що атомна вага аргону (39,9) більша, ніж атомна вага калію (39,1), а аргон в таблиці стоїть п е р е д калієм. І в телуру, що стоїть п е р е д йодом, атомна вага виявилась більша, ніж у йоду.

Сам Менделєєв не вагався допустити ці винятки в таблиці. Звідси випливає, що не атомна вага визначає положення елементу в таблиці. Але тоді що саме? Очевидно, сукупність усіх хімічних властивостей. А від чого залежать хімічні властивості?

Не тільки це неясне було в таблиці. Твердо було встановлено, скільки повинно було бути елементів у перших періодах таблиці, але зовсім було неясно, скільки елементів повинно бути в останніх її періодах.

Найголовніше ж, що було неясне,— це сам періодичний закон. Він вимагав від науки розв'язання найбільшого, здавалося, нерозв'язного, завдання — пояснити періодичність хімічних властивостей елементів, з яких складається увесь світ, що оточує нас.

ЯК РАДІОАКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ ЗНАЙШЛИ СВОЇ МІСЦЯ В ТАБЛИЦІ МЕНДЕЛЄЄВА

Розвиток науки поставив періодичний закон перед новим, ще суворішим випробуванням, ніж ті, з яких він вже з честю вийшов. Це було на початку нашого століття.

Елементи, передбачені Менделєєвим, вже були знайдені. Нова група благородних газів, виявлена спочатку на Сонці, а потім і на Землі, вже знайшла своє місце в таблиці. Здавалося, усе було закінчено і все ясно.

Але ось у Франції два скромних учених, подружжя П'єр і Марія Кюрі, зацікавились дивним явищем, відкритим іншим ученим — Беккерелем. Вони вирішили з'ясувати, чому мінерали і руди, що містять уран, висилають загадкові невидимі промені, здатні проникати крізь непрозорі тіла і діяти на фотографічну пластинку. Дуже скоро вони виявили, що в природі існують такі мінерали, в яких урану мало, а на пластинку ці мінерали діють далеко сильніше, ніж чистий уран. Подружжя Кюрі розпочало величезну, що тривала довгі роки їх життя, роботу по шуканню нових невідомих елементів — носіїв радіоактивного випромінювання.

Першим був відкритий полоній, слідом за ним — радій. Це були нові елементи, таких наука ще не знала. Їх радіоактивність була в тисячі раз сильніша, ніж урану. Чудесні властивості різко відрізняли їх від усіх відомих раніше елементів.

Навіть легкий дотик до них спричиняє тяжкі опіки. Алмаз, піднесений до радію, починає яскраво світитися голубим сяйвом. Ще яскравіше світиться сірчистий цинк. Заряджені тіла негайно втрачають свої електричні заряди, коли до них наближають радій. Але найголовніше — нові елементи виділяють мимовільно величезні кількості енергії. Радій сам по собі без усякого впливу завжди залишається нагрітим. Кожної години один грам радію виділяє 136 калорій тепла.

Ці таємничі властивості вразили вчених. Але тоді ніхто не підозрював, що це був тільки початок, початок нової ери людства — атомного віку.

Досить швидко, як тільки були вивчені хімічні властивості нових елементів, вони знайшли свої місця в періодичній системі. Виявилось, що обидва елементи —і полоній, і радій— теж колись були передбачені Менделєєвим. Радій — це був екабарій, він зайняв 88-у клітку в періодичній системі, полоній — 84-у. Його Менделєєв називав двітелуром. Отже, місце для них було, і здавалось, що все благополучно. Але коли були досліджені докладно властивості нових радіоактивних елементів, виявились зовсім несподівані для науки явища.

Найважливішим було те, що з відкриттям радіоактивних елементів загинули звичні і, здавалося, непохитні уявлення про вічність і незмінність кожного елементу. Нові елементи були несталі, вони народжувались і зникали, перетворюючись в інші елементи. Одні з них зникали протягом мільйонних часток секунди, інші жили тисячі років. Їх властивість висилати невидиме проміння свідчила про розпад їх атомів.

А коли були досліджені докладніше усі три сорти проміння, що висилались радіоактивними елементами, виявилось, що одне з них являє собою потік ядер атомів гелію, які несуть на собі по два позитивні заряди, — це альфа-проміння, друге — потік негативно заряджених електронів — бета-проміння і, нарешті, третє — гамма-проміння — схоже з світлом, але має значно коротшу довжину хвилі.

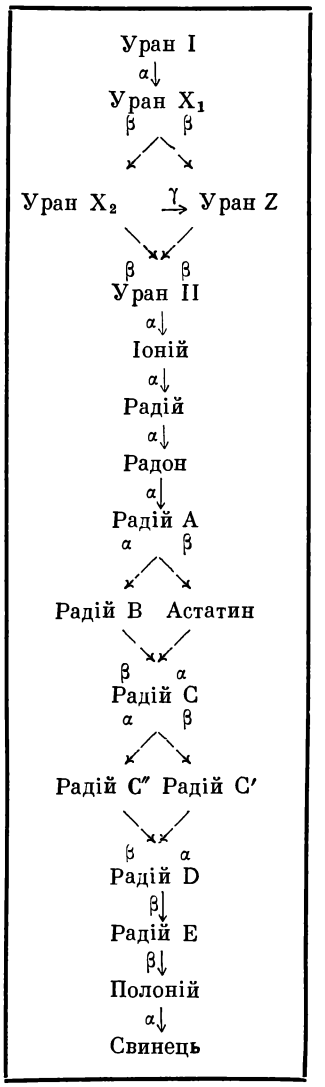
Ціла армія фізиків і хіміків в усьому світі включилася в «полювання» за новими радіоактивними елементами. І незабаром їх знайдено було так багато, що в учених вичерпалась фантазія і пропала охота давати їм нові самостійні імена. Їх почали позначати просто за назвою їх «предків» з додаванням різних букв.

Незабаром було знайдено, що радій — далекий потомок урану. Сам радій перетворюється в радіоактивний газ радон. І при кожному перетворенні радіоактивний атом обов'язково висилає або заряджені ядра атомів гелію (α-частинки), або електрони (β-частинки).

Ось скільки потомків виявилось у ряді розпаду урану (див. рисунок на цій сторінці. Поряд із стрілочкою помічено, яку частинку — α або β — викидає атом при розпаді).

Не менше потомків знайдено було і в елементу торію, який теж виявився радіоактивним. І майже стільки ж у ряді актинію. Незабаром фізики знайшли понад сорок нових радіоактивних елементів.

І перед наукою знову постало важке і принципово важливе питання: де і як знайти місця в періодичній системі для всіх цих нових численних елементів? Їх було далеко більше, ніж залишалось вільних кліток у таблиці.



Ряд розпаду урану.

Це завдання науці довелося розв'язувати вже без допомоги і без участі Менделєєва. Йому не судилося дожити до останнього, найтруднішого випробування великої його ідеї.

Хіміки почали працювати над визначенням хімічних властивостей нових радіоактивних елементів. Це було важке завдання. Адже серед них були такі, які «жили» найменші частки секунди.

Розгадку було знайдено, коли радіоактивні елементи були настільки добре вивчені, що стало можливим зіставити природу проміння, що висилається елементом, з його хімічною природою і з природою того нового елементу, який з нього утворюється при радіоактивному перетворенні. Розгадку було знайдено знов-таки з допомогою періодичної системи Менделєєва.

Досліджуючи властивості урану X_1 — найближчого потомка урану, його «сина», хіміки скоро переконались, що за своїми хімічними властивостями він нерозрізненний від давно відомого торію. Але все-таки це не був знайомий хімікам торій. Торій — звичайний елемент, його радіоактивність така слабка, що її важко виявити. А уран X_1 дуже радіоактивний, швидко розпадається, через 24 дні від нього залишається тільки половина тієї кількості, що була раніше.

Загалом, це новий елемент. Але все-таки хімічно — це торій. Якщо уран X_1 змішати з торієм, ніякими хімічними реакціями розділити їх неможливо.

Уран перетворюється в UX_1, висилаючи α-проміння. На кожний атом урану, що розпався, з його ядра вилітає α-частинка і виносить два позитивних заряди. Уран займає 92-е місце в таблиці, у сьомому періоді. А де повинен бути його перший потомок, UX_1? Торій Менделєєв вмістив у 90-у клітку своєї системи. А UX_1 не можна відрізнити від торію. Після

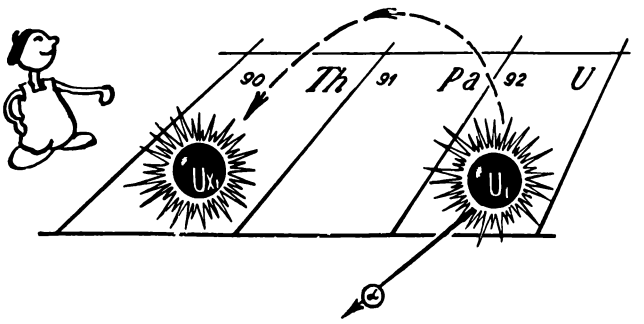


Рис. 1.

довгих і важких шукань і вагань довелося визнати, що місце для UX_1 — в клітці, де знаходиться торій; α-частинка виносить з ядра атома два позитивних заряди, і при цьому утворюється новий атом, що займає в періодичній таблиці місце з номером, на дві одиниці меншим (рис. 1).

Прослідкуємо тепер, що відбувається з UX_1 далі при його розпаді. Він зазнає β-перетворення, утворюючи нову радіоактивну речовину, яку було позначено UX_2, яка зникає ще швидше. Виявилось, що за хімічними властивостями UX_2 повинен бути вміщений в 91-у клітку (рис. 2).

Але втрата ядром атома одного негативного заряду рівноцінна набуттю одного позитивного заряду. В результаті вийшло, що при збільшенні позитивного заряду ядра елементу на одиницю утворюється новий елемент, що займає в періодичній системі клітку, номер якої на одиницю більший. В свою чергу UX_2, знову втрачає β-частинку і перетворюється в уран II, який зовсім нерозрізненний від свого «прадіда» — звичайного урану і повинен бути вміщений в одній клітці з ним, тобто зайняти 92-е місце в таблиці. І завжди збільшення позитивного заряду ядра на одиницю (втрата одного негативного електрона) приводить до такої зміни хімічних властивостей, яка відповідає збільшенню порядкового номера елементу на одиницю.

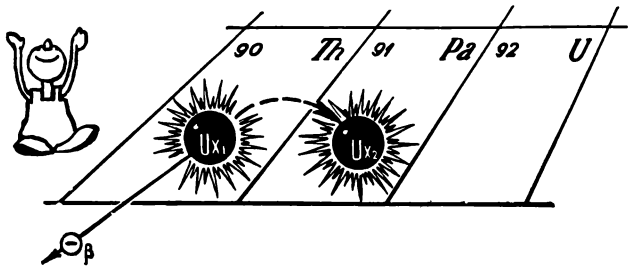


Рис. 2.

Вивчаючи радіоактивні елементи, хіміки зустрілись з новим, разючим фактом. Подивіться самі, що вийшло. Атомна вага урану — 238. Кожний атом його на шляху радіоактивного перетворення до урану II втрачає послідовно одну α-частинку (тобто ядра атомів гелію, атомна вага якого чотири) і дві β-частинки (це легкі, з мізерною масою електрони). В результаті заряд ядра атома радіоактивного урану II виявився таким же, як у звичайного урану. І за своїми хімічними властивостями він не відрізнявся від звичайного урану (рис. 3).

Але атомна вага стає, звичайно, зовсім іншою. Кожна α-частинка, що вилітає, зменшує атомну вагу на чотири одиниці, а при β-перетвореннях вона залишається сталою.

Зміна атомної ваги урану

$UI - \alpha - \beta - \beta = UII$
$238 - 4 - 0 - 0 = 234$

В одній і тій самій клітці, де, як вважав Менделєєв, повинен бути тільки один елемент із своєю, властивою тільки йому атомною вагою, тепер опинились дві різні речовини, з різними фізичними ознаками і, найголовніше, хоч і з різною атомною вагою, але з однаковими хімічними властивостями. Виявилось, що один і той самий елемент може мати різну атомну вагу.

Але цього мало. Здобуто ще дивовижніший результат: при β-розпаді атомна вага не змінюється, а хімічна природа елементу змінюється дуже різко. Уран X_1 — це за хімічними властивостями торій, а уран X_2 займає 91-е місце і за хімічними властивостями нерозрізненний від відомого вже раніше елементу протактинію (Pa); отже, різні елементи можуть мати однакову атомну вагу.

Що ж кінець кінцем вийшло? Як основну ознаку елементу Менделєєв прийняв атомну вагу. Але кінцевим продуктом в ряді радіоактивного розпаду урану є радій D, його атомна вага 206. Цей елемент вже не активний, а хімічно нерозрізненний від свинцю.

При розпаді торію кінець кінцем утворю-

ється теж неактивний торій D, його атомна вага 208. За хімічними властивостями це теж свинець.

Ряд розпаду актинію обривається на неактивному продукті—актинію D, його атомна вага 207, а хімічно він — знов-таки свинець.

Але мало цього, в цих рядах є ще радіоактивні проміжні продукти розпаду: радій B з атомною вагою 214, радій B з атомною вагою 210, торій B — атомна вага 212 і актиній D — 211.

І всі ці радіоактивні елементи, всі до одного абсолютно схожі з свинцем, і всі вони мають різну атомну вагу.

Але ж у кожній клітці може бути тільки один елемент з його власною атомною вагою! У клітці № 82 може бути свинець з атомною вагою 207,18. Вивчаючи радіоактивні елементи, вчені знайшли ще сім речовин з атомною вагою 214, 212, 211, 210, 208, 207, 206 і хімічними властивостями свинцю.

Наука опинилась в дуже важкому стані. Як же їх розмістити в періодичній таблиці? Їх не можна вважати різними елементами — це все свинці, але вважати одним елементом, однією різновидністю атомів теж не можна — у них різна атомна вага.

Кінець кінцем стало ясно, що всі вони повинні займати одне місце в таблиці Менделєєва. Їх так і називають — «ізотопи» (від грецьких слів: «рівний» і «місце»).

Це випробування для періодичного закону було дуже важке. Одержані при вивченні радіоактивних елементів результати, з якими ми щойно коротко ознайомились, поставили під сумнів основу періодичної системи. Стало цілком ясно, що атомна вага не може служити величиною, яка визначає хімічні властивості елементу. І наука знову спинилась перед великим завданням.

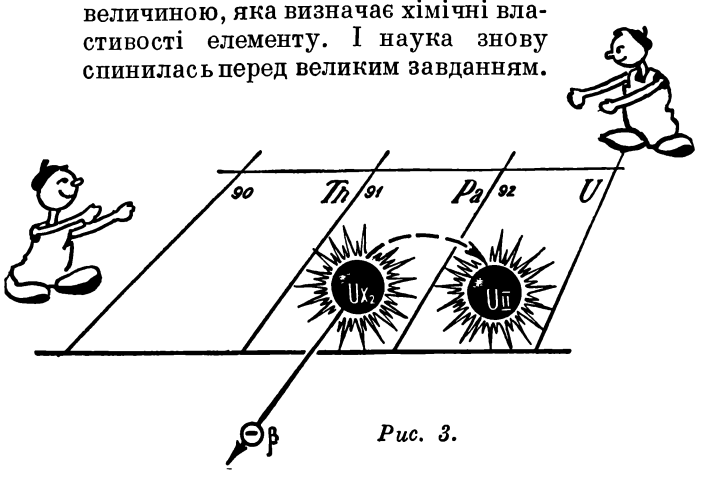


Рис. 3.

ЩО Є ОСНОВОЮ ВЕЛИКОГО ЗАКОНУ

Періодичний закон — великий закон природи, відкритий Менделєєвим, залишається непохитним. Але атомна вага, прийнята Менделєєвим як основна характеристика хімічного елементу, не витримала важкого іспиту.

Що ж замінило атомну вагу? Як розташовані елементи в новій менделєєвській таблиці? Дослідження радіоактивних елементів дало змогу знайти відповідь на це велике і важливе для пізнання навколишнього світу питання.

Простежте уважно на рисунку подорож радіоактивного атомного ядра, що розпадається, по періодичній системі (рис. 4). По дорозі атом урану побуває в десятьох клітках двох останніх рядів таблиці Менделєєва, доки не перетвориться у стійкий атом свинцю. Він зазнає чотирнадцяти послідовних перетворень, утворюючи вісімнадцять ізотопів десяти різних елементів. Одні з цих ізотопів живуть мільярди років (уран I), інші — сотні тисяч років (уран II), є серед них такі, що зникають за тисячні частки секунди (радій C_1), і тільки свинець (радій D) — вічний.

При кожному перетворенні атом, що висилає α-частинку, зсувається по таблиці вліво в клітку з номером, меншим на дві одиниці, а атом, що зазнає β-перетворення, — на одну клітку вправо. Атоми RaA і RaC можуть розпадатись зразу в двох напрямах.

При цьому атом урану втрачає десять позитивних зарядів:

$$8 \times (+2) + 6 \times (-1) = 10.$$

Зауважте, що при цьому з елементом відбуваються такі глибокі зміни його хімічної природи, які відповідають переміщенню елементу з 92-ї клітки — місця урану — у 82-у, де знаходиться свинець. І десятьом втраченим позитивним зарядам відповідають десять номерів у періодичній системі.

Хімія радіоактивних елементів змусила припустити, що в основі періодичного закону повинен лежати інший фундамент — не атомна вага, а позитивний заряд атомного ядра.

Але остаточно періодичну закономірність пояснила фізика. Вона виявила загадкову таємницю чергування елементів із схожими хімічними властивостями. Фізика роз'яснила бездіяльність елементів групи інертних газів, правильну послідовність зростання валентності.

Стали ясними і винятки в таблиці. Але

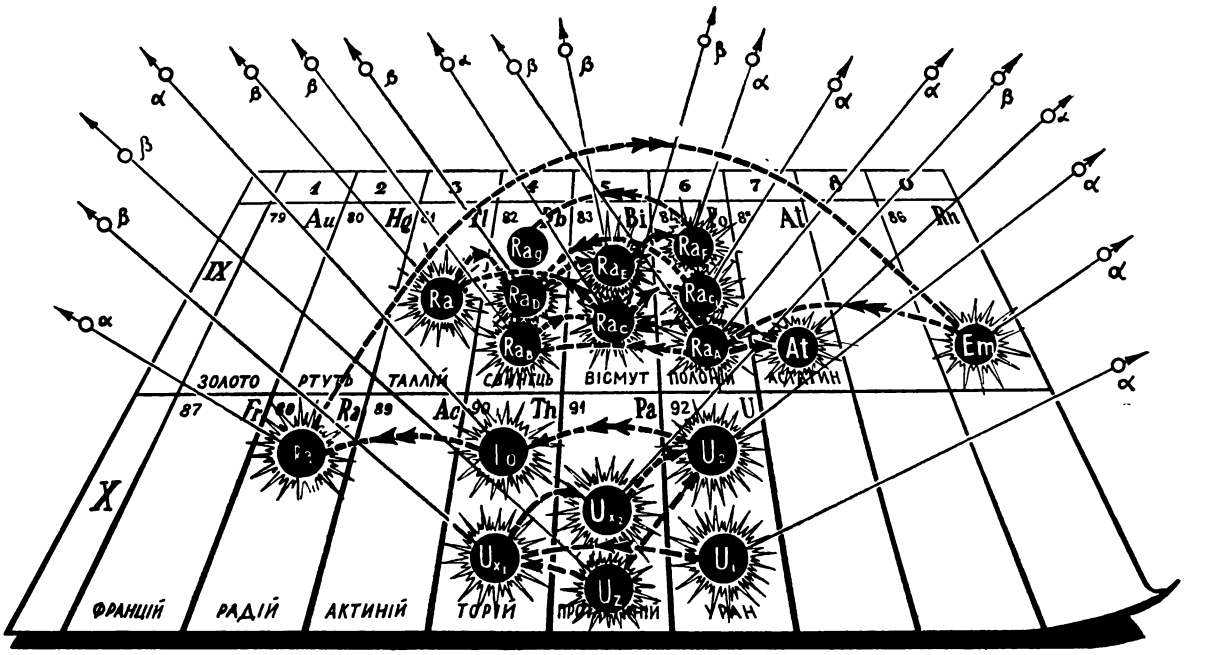


Рис. 4.

ніколи не вдалося б цього досягти, якби в руках дослідників, учених, що виявляли найглибші таємниці природи, не було могутнього провідного маяка — періодичного закону. Без нього ми не дізнались би, як побудований атом, не проникли б всередину атома і не оволоділи б його енергією, не знали б природи сил, які зв'язують атоми різних елементів між собою. Ми не могли б розшифрувати будову найскладніших хімічних сполук, не змогли б створювати нові речовини з потрібними нам властивостями.

Якби Менделєєв не відкрив періодичного закону, він однаково був би відкритий. Але хто може сказати, на скільки років затримався б розвиток науки?

По суті наша розповідь про створення періодичної системи елементів закінчена, але далеко не закінчена історія розвитку періодичного закону.

У наші дні таблиця хімічних елементів зовсім не така, якою колись створив її Менделєєв. Місце атомної ваги у ній зайняв атомний номер, що дорівнює величині позитивного заряду атомного ядра.

Величина атомного номера дозволила твердо встановити, скільки елементів повинно бути в кожному періоді. Ми знаємо, що разом з ураном, найважчим з елементів, що існували на Землі до наших днів і до того часу, коли людина сама навчилася створювати нові елементи, усього було 92 елементи, не більше і не менше.

Правда, ми ще точно не знаємо, скільки нових елементів може бути створено людиною, скільки і які елементи важчі за уран існують у надрах далеких зірок, де йдуть поки що незнані ядерні процеси і народжуються атоми.

Атомний номер елементу, що дорівнює одиниці у водню — першого елементу періодичної системи, п'яти — у п'ятого по порядку берилію, двадцяти шести — у заліза, яке стоїть на двадцять шостому місці, фізики визначили не шляхом дослідження хімічних властивостей елементу, а вивчаючи чисто фізичні властивості речовини.

Молодий фізик Мозлі, що загинув у першій світовій війні, досліджуючи рентгенівські спектри елементів, знайшов, що довжина хвилі рентгенівського випромінювання елементу в рентгенівській трубці залежить від місця, яке займає цей елемент в таблиці Менделєєва. Можна, знаючи рентгенівський спектр невідомого елементу, визначити, де він повинен стояти у періодичній системі, визначити його атомний номер.

Цей метод виявився абсолютним: з нього не було винятку. Аргон, як ви пам'ятаєте, важчий, ніж калій, за атомною вагою. Це було загадковим винятком у таблиці Менделєєва. Дослідження рентгенівських спектрів пока-

зало, що атомний номер аргону дорівнює 18, номер калію—19 — точно так, як вони розміщені в таблиці.

З'явилась нова, чисто фізична ознака елементу — його атомний номер, що обчислюється за вимірюванням довжини хвилі рентгенівського випромінювання елементу.

Атомний номер швидко знайшов своє пояснення. Дослідження радіоактивності разом з дослідженням рентгенівських спектрів привело до розгадки таємниці атомного номера.

Виявилося, що атом кожного елементу має важке центральне ядро, в якому зосереджена майже вся маса атома, і атомний номер дорівнює числу позитивних зарядів ядра.

Розгадка періодичної закономірності була знайдена, коли розгадано було найскладнішу природу будови зовнішньої електронної оболонки атомів, законів руху електронів навколо ядра.

Десятки, сотні і тисячі вчених у всьому світі працювали над розгадкою таємниці будови атома. Теоретики, створюючи нові моделі атома, керувались періодичним законом. Експериментатори, як фізики, так і хіміки, відшукуючи нові закономірності, відкриваючи нові факти, завжди зіставляли свої результати з системою Менделєєва.

Природна, як її назвав Менделєєв, система елементів не тільки вимагала пояснення загадкової таємниці періодичності, але вона ж і керувала наукою в шуканні розгадки цієї таємниці.

ПЕРІОДИЧНИЙ ЗАКОН— ЗАКОН БУДОВИ АТОМА

Довгим і важким шляхом ішла наука до розгадки великої таємниці періодичного закону. Він втілив у собі всю неосяжну різноманітність нескінченної безлічі хімічних процесів і перетворень у навколишньому світі. Він вніс стрункість і порядок у хімію, де панував хаос уривкових і незв'язаних відомостей, фактів, спостережень, нагромаджених багатьма поколіннями хіміків.

Але чому ж існує таємнича правильна повторюваність властивостей хімічних елементів? Чому натрій схожий на літій, а хлор схожий з фтором? Чому існують бездіяльні «лініві» гази? Чому кисень і сірка, що стоять у шостій групі таблиці, сполучаються кожний з двома атомами водню, а атоми вуглецю і кремнію, що знаходяться обидва в четвертій групі, утворюють з воднем сполуки, які містять по чотири водневих атоми? Чому елементи так слухняно підкоряються періодичному законові? Багато можна задати таких запитань.

На всі ці запитання наука в наші дні вже знайшла відповідь.

Тепер ми знаємо, що таємниця періодичного закону, таємнича причина всіх закономірностей, які керують перебігом усіх хімічних реакцій між усіма хімічними елементами, що дають незліченну безліч сполук, з яких складаються усі тіла в навколишньому чудесному нескінченному світі, перестала бути таємницею. Вона тепер виявлена в розгаданих наукою законах руху електронів в атомах, в законі будови, як ми його тепер називаємо, електронних оболонок атома. Ми знаємо вже, що атом кожного елементу має ядро. Навколо ядра рухаються електрони. Рухаються за точними законами, на певних відстанях, рухаються з неймовірними, дивовижними швидкостями, так що наука сьогоднішнього дня ще не може устежити за кожним з них, і вони немовби зливаються для нас у суцільні електронні оболонки.

Якби ми могли розглянути атом, то, найімовірніше, він здався б нам схожим на хмарку, що пульсує, змінює свою форму і розміри.

Але навіть порівнюючи з мізерними розмірами цієї електронної хмарки-атома, зникаюче мала величина атомного ядра, що знаходиться в центрі атома.

Якби ми захотіли показати на рисунку схему будови атома і позначити ядро точкою завбільшки в один міліметр, то в цю книгу довелося б вклеїти сторінку розміром більше Красної площі у Москві, бо інакше зображення атома не змогло б уміститись. Сторінка була б порожньою, і лише точка в центрі її зобразила б атомне ядро, а десь біля країв цієї гігантської сторінки проходили б орбіти, по яких повинні рухатись найбільш зовнішні електрони. Розміри атома в сотні тисяч раз більші за розміри його ядра.

І орбіти електронів в атомі ми вміємо тепер точно розраховувати. Ми знаємо, наскільки міцно зв'язані електрони з ядром і скільки енергії потрібно затратити, щоб відірвати кожний з них від ядра. А саме від цього і залежать усі хімічні властивості атома, цим визначаються ті сили, що зв'язують атоми у складні хімічні молекули речовин, які утворюють все навколо нас, а також і наше тіло.

Ще не так давно навіть самий творець періодичної таблиці Менделєєв вважав атоми взагалі непізнаванними. А в наші дні вчені

сперечаються про тонкі деталі будови атомів, створених самою людиною.

Тепер ми твердо знаємо, що у самого легкого газу — водню — в кожному атомі один електрон. Найкраще ми знаємо закони руху електрона навколо ядра водню. Ці закони визначають і спектр водню — ті світлові хвилі, які висилаються атомами водню і в полум'ї заводської топки, де згоряє нафта, що містить водень, і на Сонці, де бушують дивовижні вихори розжареного водню. І цей свій єдиний електрон атом водню може порівняно легко втрачати.

У другого елементу — гелію — два електрони, і обидва вони дуже міцно зв'язані з ядром, так що вибити їх з атома дуже важко.

У всіх елементів два перших, найближчих до ядра електрони однаково міцно зв'язані з ядром. Вони утворюють першу електронну оболонку, що складається усього з двох електронів.

У елементу літію, що займає третє місце в таблиці Менделєєва, два перших електрони теж міцно зв'язані з ядром, а третій значно слабше. Цей електрон попадає у другу, зовнішню, електронну оболонку.

У четвертого — берилію — у зовнішній оболонці два електрони, у п'ятого — бору — три, у шостого — вуглецю — чотири, в азоту — п'ять, у кисню — шість, у фтору — сім електронів у зовнішній оболонці.

А у десятого елементу — неону, благородного газу, у зовнішній оболонці вісім електронів. Усі вони міцно зв'язані з ядром, як і електрони атома благородного газу гелію. Відірвати їх майже неможливо, і більше електронів у зовнішній електронній оболонці атома бути не може. Дальший електрон в елементу, ядро якого має 11 позитивних зарядів, — у металу натрію — може вміститись тільки на новій електронній оболонці атома, віддаленій від ядра значно більше.

А далі все повторюється знову: у дванадцятого елементу — магнію — у зовнішній оболонці два електрони, у тринадцятого — алюмінію — три, у чотирнадцятого — кремнію — чотири, у фосфору — п'ять, у сірки — шість, у хлору — сім.

Але магній схожий на берилій, алюміній схожий у своїх хімічних властивостях з бором, кремній — з вуглецем, хлор — з фтором.

У схожих за властивостями елементів зовнішні електронні оболонки побудовані однаково.

На кольоровій таблиці (стор. 500) зображено початок періодичної таблиці — три її перших періоди. Але у відповідних клітках таблиці поряд з хімічним символом і атомним номером вміщені схеми будови атомів — їх електронних оболонок.

Дальші довгі періоди періодичної таблиці дуже важко зобразити на рисунку. В елементів у клітках цих періодів по 18 і по 32 електрони у внутрішніх оболонках. Їх не зобразити у такій таблиці. Тому обмежимось тільки одним прикладом.

ЧОМУ В ОДНОМУ СТОВПЦІ СТОЯТЬ ПОРЯД ЗАЛІЗО, КОБАЛЬТ, НІКЕЛЬ

У середині четвертого довгого періоду менделєєвської таблиці знаходяться три елементи, що займають поряд 26-е, 27-е і 28-е місця. Це дуже схожі один з одним елементи. Вони навіть розташовані разом, в одному стовпці,

Таблиця 35. До Менделєєва нічого не було відомо про елементи, які займають тепер у періодичній таблиці порядкові номери 2, 10, 18, 21, 31, 32, 36, 43, 54, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 70, 71, 72, 75, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101. Одні з них не були ще відкриті, інші не існували зовсім. Крім того, у багатьох з відомих у той час елементів була невірно визначена їх атомна вага. Досить добре були вивчені тільки 54 елементи (вони позначені на таблиці зеленим кольором). Менделєєв передбачив існування дванадцяти нових елементів. Для трьох із них він передбачив заздалегідь усі найважливіші фізичні і хімічні властивості не тільки самих елементів, але й деяких їх сполук. Це були елементи 21, 31 і 32 (їх клітки забарвлені у жовтий колір). Крім цих елементів, ним були передбачені: 43, 72, 75, 84, 85, 87, 88, 89, 91 (бузкові клітки). Не роблячи ніяких вимірювань, він виправив невірну атомну вагу і передбачив точні її значення для елементів 4, 39, 49, 57, 58, 59, 68, 90, 92 (голубий колір). Таким чином, по суті ним був передбачений 21 елемент. За прикладом Менделєєва, на підставі його закону були передбачені елементи 10, 36, 54, 86 (вони позначені синьою фарбою). Після встановлення періодичного закону були відкриті елементи 2, 18, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 70, 71 (рожевий колір). Елементи 43, 61, 85 не були знайдені в природі. Вони були створені людиною. Елементи 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101 лежать за межами таблиці часів Менделєєва; їх також не було на Землі, всі вони створені штучно, і шляхи до їх синтезу вказані періодичним законом Менделєєва (штучно добуті елементи помічено на таблиці ясно-бузковим кольором). Елементи 43, 85, 87 помічені на таблиці двома кольорами — рожевим і бузковим. Це штучно добуті елементи, які були передбачені Д. І. Менделєєвим.

ПЕРІОДИЧНА СИСТЕМА ЕЛЕМЕНТІВ Д. І. МЕНДЕЛЄЄВА

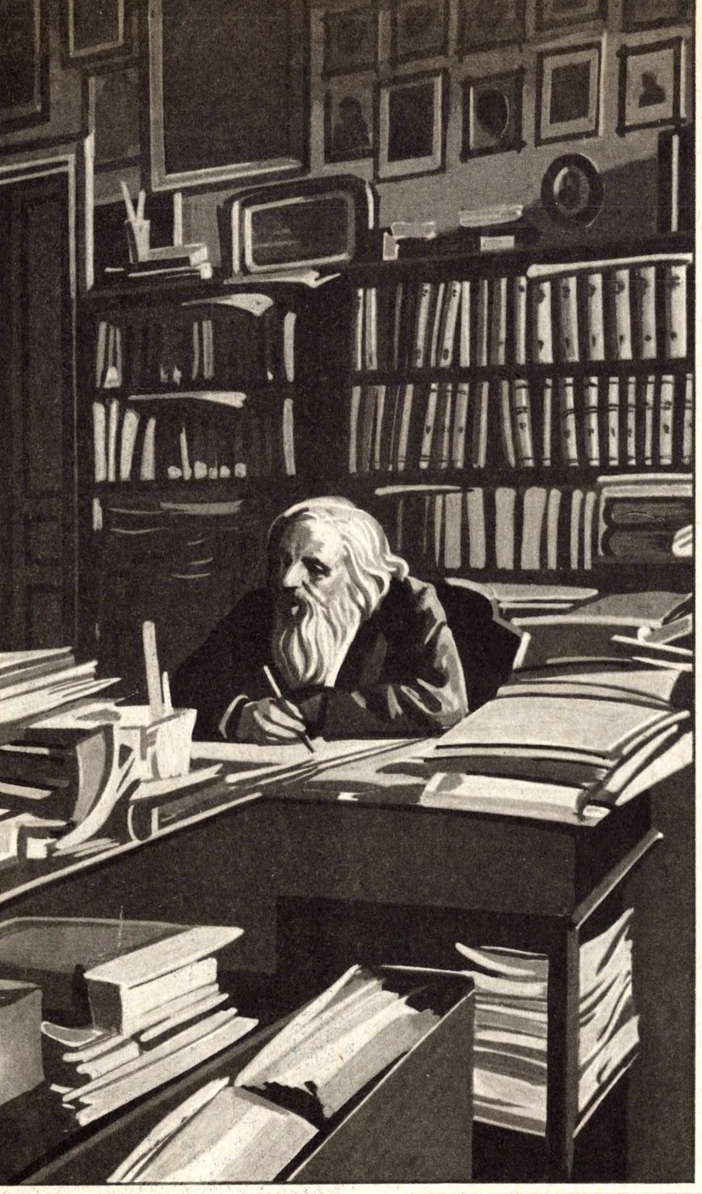
ПЕРІОДИ	РЯДИ	ГРУПИ ЕЛЕМЕНТІВ I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		0
1	I	H 1 ВОДЕНЬ 1.0080						(H)			He 2 ГЕЛІЙ 4.003
2	II	Li 3 ЛІТІЙ 6.940	Be 4 БЕРИЛІЙ 9.013	5 B ЬОР 10.82	6 C ВУГЛЕЦЬ 12.011	7 N АЗОТ 14.008	8 O КИСЕНЬ 16	9 F ФТОР 19.00			Ne 10 НЕОН 20.183
3	III	Na 11 НАТРІЙ 22.997	Mg 12 МАГНІЙ 24.32	13 Al АЛЮМІНІЙ 26.98	14 Si КРЕМНІЙ 28.06	15 P ФОСФОР 30.975	16 S СІРКА 32.066	17 Cl ХЛОР 35.457			Ar 18 АРГОН 39.944
4	IV	K 19 КАЛІЙ 39.100	Ca 20 КАЛЬЦІЙ 40.08	Sc 21 СКАНДІЙ 44.96	Ti 22 ТИТАН 47.90	V 23 ВАНАДІЙ 50.95	Cr 24 ХРОМ 52.01	Mn 25 МАРГАНЕЦЬ 54.94	Fe 26 ЗАЛІЗО 55.85	Co 27 КОБАЛЬТ 58.94 Ni 28 НІКЕЛЬ 58.69	
	V	29 Cu МІДЬ 63.54	30 Zn ЦИНК 65.38	31 Ga ГАЛІЙ 69.72	32 Ge ГЕРМАНІЙ 72.60	33 As МИШ'ЯК 74.91	34 Se СЕЛЕН 78.96	35 Br БРОМ 79.916			Kr 36 КРИПТОН 83.80
5	VI	Rb 37 РУБІДІЙ 85.48	Sr 38 СТРОНЦІЙ 87.63	Y 39 ІТРІЙ 88.92	Zr 40 ЦИРКОНІЙ 91.22	Nb 41 НІОБІЙ 92.91	Mo 42 МОЛІБДЕН 95.95	Tc 43 ТЕХНЕЦІЙ (99)	Ru 44 РУТЕНІЙ 101.1	Rh 45 РОДІЙ 102.91 Pd 46 ПАЛАДІЙ 106.7	
	VII	47 Ag СРІБЛО 107.880	48 Cd КАДМІЙ 112.41	49 In ІНДІЙ 114.76	50 Sn ОЛОВО 118.70	51 Sb СУРМА 121.76	52 Te ТЕЛУР 127.61	53 J ЙОД 126.91			Xe 54 КСЕНОН 131.30
6	VIII	Cs 55 ЦЕЗІЙ 132.91	Ba 56 БАРІЙ 137.36	La 57 ЛАНТАН 138.92	Hf 72 ГАФНІЙ 178.60	Ta 73 ТАНТАЛ 180.95	W 74 ВОЛЬФРАМ 183.92	Re 75 РЕНІЙ 186.31	Os 76 ОСМІЙ 190.2	Ir 77 ІРИДІЙ 192.2 Pt 78 ПЛАТИНА 195.23	
	IX	79 Au ЗОЛОТО 197.0	80 Hg РТУТЬ 200.61	81 Tl ТАЛІЙ 204.39	82 Pb СВИНЕЦЬ 207.21	83 Bi ВІСМУТ 209.00	84 Po ПОЛОНІЙ (210)	85 At АСТАТИН (210)			Rn 86 РАДОН 222
7	X	Fr 87 ФРАНЦІЙ (223)	Ra 88 РАДІЙ 226.05	Ac 89 АКТИНІЙ 227	(Th)	(Pa)	(U)				

ЛАНТАНОЇДИ 58 – 71

Ce 58 ЦЕРІЙ 140.13	Pr 59 ПРАЗЕОДИМ 140.32	Nd 60 НЕОДИМ 144.27	Pm 61 ПРОМЕТІЙ (145)	Sm 62 САМАРІЙ 150.43	Eu 63 ЄВРОПІЙ 152.0	Gd 64 ГАДОЛІНІЙ 156.9	Tb 65 ТЕРБІЙ 158.93	Dy 66 ДИСПРОЗІЙ 162.46	Ho 67 ГОЛЬМІЙ 164.94	Er 68 ЕРБІЙ 167.27	Tu 69 ТУЛІЙ 168.94	Yb 70 ІТЕРБІЙ 173.04	Lu 71 ЛЮТЕЦІЙ 174.99

АКТИНОЇДИ 90 – 101

Th 90 ТОРІЙ 232.05	Pa 91 ПРОТАКТИНІЙ (231)	U 92 УРАН 238.07	Np 93 НЕПТУНІЙ (237)	Pu 94 ПЛУТОНІЙ (242)	Am 95 АМЕРИЦІЙ (243)	Cm 96 КЮРІЙ (245)	Bk 97 БЕРКЛІЙ (247)	Cf 98 КАЛІФОРНІЙ (249)	En 99 ЕЙНШТЕЙНІЙ (253)	Fm 100 ФЕРМІЙ (255)	Mv 101 МЕНДЕЛЕВІЙ (256)

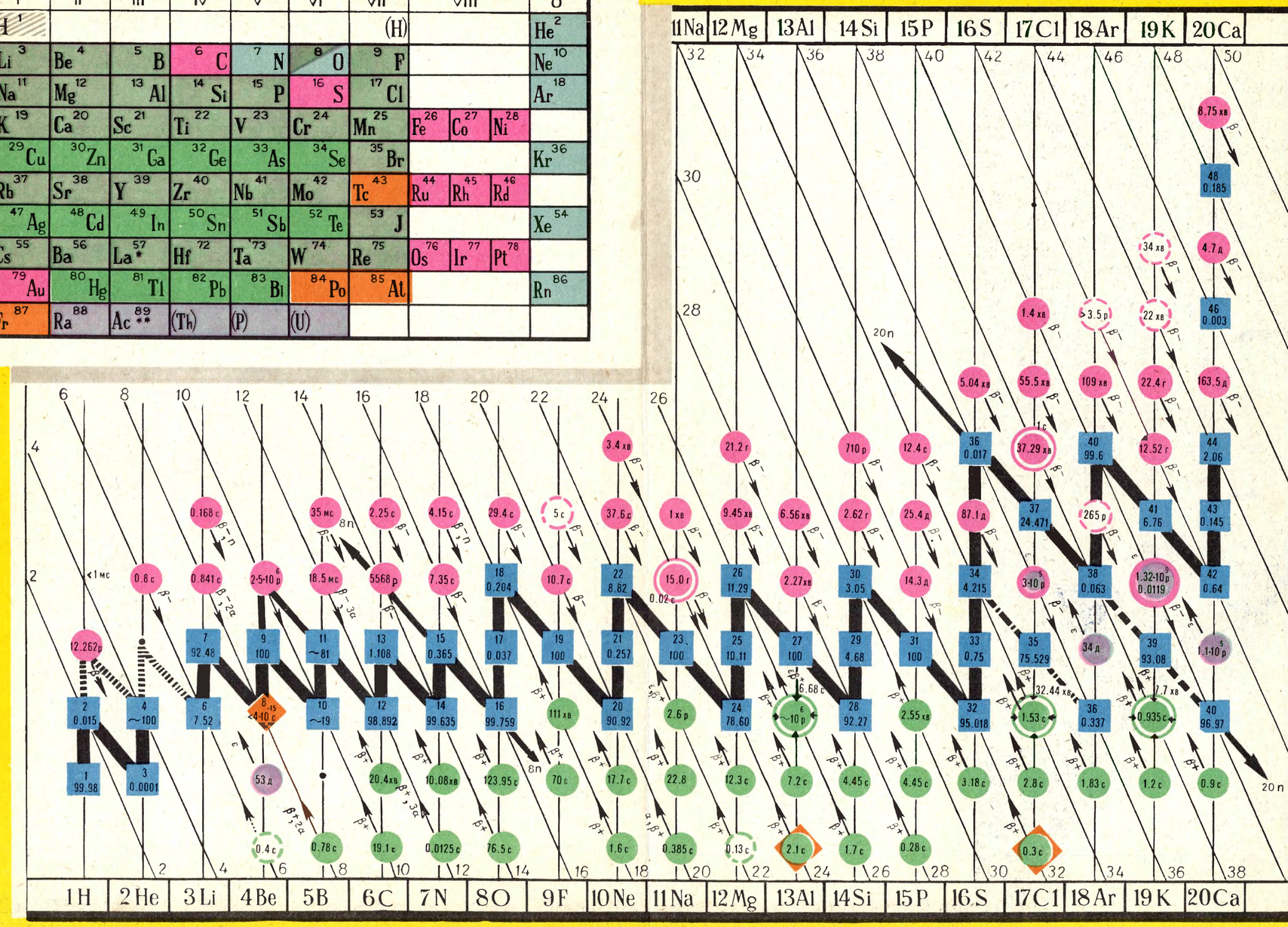


ДМИТРО ІВАНОВИЧ МЕНДЕЛЄЄВ

ПЕРІОДИЧНИЙ ЗАКОН ХІМІЇ ЗЕМНОЇ КОРИ

ПЕРІОДИ	РЯДИ	ГРУПИ ЕЛЕМЕНТІВ								
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	0
1	I	H 1						(H)		He 2
2	II	Li 3	Be 4	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9		Ne 10
3	III	Na 11	Mg 12	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17		Ar 18
4	IV	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26 Co 27 Ni 28	
	V	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35		Kr 36
5	VI	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44 Rh 45 Rd 46	
	VII	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	J 53		Xe 54
6	VIII	Cs 55	Ba 56	La* 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76 Ir 77 Pt 78	
	IX	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85		Rn 86
7	X	Fr 87	Ra 88	Ac ** 89	(Th)	(P)	(U)			

ПОЧАТОК ПЕРІОДИЧНОЇ ТАБЛИЦІ АТОМНИХ ЯДЕР



утворюючи тріаду — залізо, кобальт і нікель. Навіть назви їх ведуть своє походження від великої їх схожості: колись у середні віки рудокопи знаходили іноді загадкові руди, схожі на залізні, з яких ніяк не вдавалося виплавити залізо. Вони вважали, що з них підсміюються гірські духи, карлики кобольди і старий чорт Нік. Звідси і назва металів: кобальт і нікель.

Ці три метали і в техніці наших днів завжди разом. Найкращі, найміцніші сплави мають у своєму складі залізо, нікель і кобальт. І хімічно вони поводять себе схоже, даючи сполуки однакового складу.

А відбувається це тому, що в них однаково побудовані зовнішні електронні оболонки. У кожного у зовнішній, валентній, оболонці по два електрони. Але зате у них відбувається, як кажуть хіміки, добудова попередньої, глибшої оболонки, електрони якої у цих елементів теж беруть участь в хімічних реакціях. Подивіться на схему і полічіть самі, скільки у них електронів у кожній з оболонок. У цих елементів внутрішні електронні оболонки однакові: найближча до ядра — гелієва, за нею — неонова, дальша — аргонова. Усі вони закінчені, міцно зв'язані з ядром. Однакові і самі зовнішні оболонки, в них тільки по два електрони (див. кольорову таблицю на стор. 500).

Це створює схожість між залізом, кобальтом і нікелем, помічену вже багато років тому.

Добудова внутрішніх оболонок атомів існує в елементів, що знаходяться у довгих періодах таблиці Менделєєва. Особливо різко вона виявлена в сімействі рідкісних земель, елементів, які майже не можна відрізнити один від одного.

ЧОМУ І ЯК СПОЛУЧАЮТЬСЯ МІЖ СОБОЮ АТОМИ

Дуже міцні електронні оболонки «лінивих» елементів. Дуже міцно тримають свої електрони атоми благородних газів, що стоять у нульовій групі періодичної системи.

Якщо втратять свої слабо зв'язані електрони атоми металів калію, натрію, кальцію та інших елементів, що стоять у перших групах таблиці, то їх електронні оболонки стануть такими ж, як оболонки атомів найближчих благородних газів, що стоять перед ними у таблиці.

У елементів, наприклад, сьомої групи у зовнішній електронній оболонці є сім електронів. Якщо такий елемент захопить один електрон, то його електронна оболонка стане такою ж, як оболонка найближчого, дальшого за ним у таблиці елементу нульової групи.

При хімічних реакціях відбувається такий перерозподіл зовнішніх електронів, що всі зовнішні електронні оболонки намагаються стати такими ж, як у найближчих благородних газів. У кисню, наприклад, для цього не вистачає двох електронів. У водню — один зайвий. Тому при утворенні води кожний атом кисню сполучається з двома атомами водню, захопивши у них ті самі два електрони, яких не вистачає його зовнішній електронній оболонці.

Які ж сили зв'язують атоми при утворенні молекул? Тепер це стало ясним. Адже атом елементу, що втратив електрон, буде заряджений позитивно, а атом, що захопив зайвий електрон, буде заряджений негативно. Між різнойменно зарядженими атомами виникнуть сили електричного притягання. З ними неважко наочно ознайомитись. Візьміть гребінець, причешіться або потріть його об сукно і піднесіть до клаптиків паперу. Клаптики «оживуть», підскочать і притягнуться до гребінця. Електронні заряди, що з'явились на гребінці, притягають папірці. Ось при цьому і виявляються ті самі сили, що зв'язують атоми один з одним. Це вони створюють незламну міцність граніту, сталі. Це ними пояснюється твердість алмазу.

Звичайно, мимоволі виникає сумнів, яким же способом ці мізерні сили, ледве здатні удержати пушинку, забезпечують таку міцність. А як ви гадаєте, з якою силою почали б притягатись один до одного електрони і позитивно заряджені ядра одного грама водню, якби ми могли розділити їх і розсунути на відстань, страшенно велику, порівнюючи з розмірами атома, на відстань, що перевищує діаметр

Таблиця 36. Початок періодичної таблиці атомних ядер від водню до кальцію. На цій ділянці знаходяться три перших періоди ядерної структури, що визначаються магічними цифрами 2, 8, 20. У лівому верхньому куті наведено таблицю, що показує зв'язок між положенням елементу в періодичній системі Менделєєва і його геохімічними властивостями. Голубою фарбою вказані елементи, які зустрічаються переважно в атмосфері, рожевою фарбою — елементи, які зустрічаються в самородному стані, зеленою — елементи, які утворюють рудні родовища; сірим кольором позначено елементи, що входять переважно до складу силікатних порід; оранжевим і бузковим — штучні і радіоактивні елементи.

атома в десятки мільйонів разів, на відстань в один міліметр? Неважко підрахувати, що ця сила буде далеко більша, ніж вага усієї земної кулі.

Таким чином, сили, що зв'язують атоми в молекули, виникають в результаті взаємодіяння позитивних ядер і негативних електронних оболонок атомів.

Це взаємодіяння завжди намагається так перебудувати зовнішню електронну оболонку, щоб вона стала найбільш міцною, найбільш стійкою, такою самою, як у найближчого елементу нульової групи.

Наприклад, при сполученні двох атомів водню в молекулу, обидва електрони від обох водневих атомів утворюють разом спільну електронну оболонку (схожу з гелієвою) навколо обох ядер.

ПЕРІОДИЧНА ТАБЛИЦЯ НАШИХ ДНІВ

Чим же відрізняється періодична система хімічних елементів Менделєєва наших днів від тієї, яку знали хіміки в часи її творця? Чи велика між ними різниця?

Мабуть, найправильнішою буде несподівана відповідь: періодична таблиця наших днів водночас і залишилась без зміни, і різниться дуже сильно від таблиці часів Менделєєва.

Побудова її не змінилась і не могла змінитись, тому що вона виражає найзагальніші закономірності природи, а вони незмінні. Залишилось незмінним розташування елементів, число і довжини періодів. Це та сама таблиця Менделєєва.

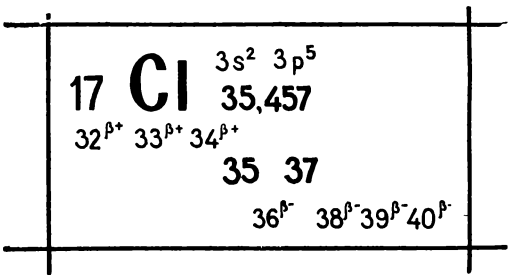
Але вона і дуже змінилась.

І найбільші, і найважливіші зміни відбулися всередині кожної клітки менделєєвської таблиці. Найкраще порівняти одну і ту саму клітку, зайняту одним і тим самим елементом, — якою вона була раніше і яка вона тепер. Виберемо для порівняння ту клітку, яку займає найзвичайнісінький для хіміка елемент — хлор. Його клітка в періодичній системі знаходилась в кінці третього періоду в сьомій групі. Там же, звичайно, вона знаходиться і тепер.

Але в часи Менделєєва вона мала ось такий вигляд:

Більше нічого було вмістити всередині клітки. Був відомий елемент хлор з точно виміряною атомною вагою 35,45, хімія якого визначалась положенням його місця в таблиці.

У наші часи клітка хлору, так само як і інших елементів, дуже змінилась. Ось який вигляд має вона тепер:



Що ж означають ці таємничі цифри і значки?

З'явилась у клітці хлору цифра 17 — це його атомний, або порядковий, номер. Він говорить, що в ядрі атома хлору 17 елементарних позитивних зарядів і навколо ядра обертаються сімнадцять електронів.

Нагорі стоять цифри і букви, схожі на якийсь таємничий шифр.

Це так і є. Цими знаками зашифровано число електронів в атомі хлору і будову його зовнішньої електронної оболонки. Ці електрони і визначають хімічні властивості елементу.

Наприклад, хлор дуже агресивний, реакційно здатний газ. У нього в індексі будови електронної оболонки стоять цифри $3s^2$ $3p^5$. Вони вказують, що в цього елементу із загального числа 17 електронів у зовнішніх частинах електронної оболонки є сім (2 + 5) слабо зв'язаних електронів. Вони і забезпечують величезну різноманітність хімічних реакцій хлору.

Атомна вага хлору виміряна точніше: знайдено, що вона тепер дорівнює 35,457, але ці цифри мають тепер вже інший зміст: це середня атомна вага хлору, тому що в наші дні ми вже знаємо, що існує не один хлор, а кілька. Відомо принаймні дев'ять різних хлорів. Дев'ять ізотопів хлору, дев'ять атомів з однаковим зарядом ядра і однаково побудованою електронною оболонкою, але з різною атомною вагою.

Одні з них стійкі, вони існують в природі. Інші створені заново людиною, вони народжуються в атомних котлах або в циклотронах, побудованих людьми.

Це радіоактивні хлори.

У нижній частині клітки хлору і перелічено ізотопи хлору та їх атомна вага.

Ми знаємо тепер, що в природі існують два різних хлори. «Легкий» хлор з атомною вагою 35 і «важкий» з атомною вагою 37, а звичайний хлор становить суміш їх із середньою атомною вагою 35,457; легкого хлору в природному хлорі значно більше.

Інші ізотопи хлору радіоактивні. Три з них висилають при розпаді позитрони, що позначено в клітці знаком β^+, це хлори з атомною вагою 32, 33 і 34.

Чотири — при розпаді висилають звичайне β-проміння, що є, як відомо, потоком електронів, що позначено значком β^-. Це хлори з атомною вагою 36, 38, 39 і 40.

Ось як багато відомостей дає тепер кожна клітка менделєєвської таблиці.

Чим ще відрізняється сучасна таблиця періодичної системи елементів від її попередниці в часи Менделєєва?

Насамперед тим, що в ній уже немає «порожніх» місць. Вона заповнена. І вона не тільки заповнена, але навіть продовжена далеко за межі урану — 92-го елементу, який колись був останнім в таблиці.

Могутність людської думки, могутність розуму, науки розсунула межі природи, і ми знаємо тепер елементи, що лежать за останнім елементом. Але не можна сказати, що вони були знайдені.

Ні, вони створені людиною, і ці нові, що не існували в природі, елементи за своїми властивостями теж підлягають великому періодичному законові.

ЯК БУЛИ СТВОРЕНІ ТРАНСУРАНОВІ ЕЛЕМЕНТИ

Питання про межі періодичної системи, мабуть, найскладніше. Скільки елементів існує в природі? Скільки їх може бути створено людиною?

У межах від водню до урану їх рівно дев'яносто два — не більше і не менше. Це доведено періодичним законом. До водню немає жодного — не може бути атомів із зарядом ядра менше одиниці.

Але скільки елементів за ураном?

На це запитання періодичний закон хімічних елементів відповіді не дає.

Д. І. Менделєєв не вважав, що уран є останнім елементом його таблиці. Він припускав можливість існування ще принаймні п'ятьох елементів за ураном. Ви можете бачити місця, залишені для них в його першій таблиці (стор. 582).

Багато попрацювали хіміки, розшукуючи в природі елементи важчі, ніж уран. Не раз у наукових журналах з'являлись торжествуючі повідомлення про достовірне «відкриття» нового важкого елементу з атомною вагою, більшою ніж в урану. Наприклад, елемент № 93 «відкривали» в природі багаторазово, він діставав імена: «богемій», «секваній». Але ці невірні відкриття виявлялись щоразу наслідком помилок. Вони по суті характеризують надзвичайну важкість точного аналітичного визначення мізерних слідів нового невідомого елементу із невивченими властивостями.

Результат цих шукань був негативний, тому що елементів, які відповідають тим кліткам таблиці Менделєєва, які повинні бути розташовані за кліткою № 92, на Землі немає. Уран — останній.

Перші спроби штучного добування нових елементів, важчих, ніж уран, були зв'язані з однією з характерних помилок в історії розвитку науки.

Помічено було, що під впливом потоку нейтронів багато елементів стають радіоактивними і починають висилати β-проміння.

Але ми знаємо, що ядро атома в результаті висилання негативного заряду зсувається у періодичній таблиці на одну клітку вправо і його порядковий номер стає на одиницю більший — відбувається перетворення елементів. Під впливом нейтронів утворюються важчі елементи.

Природно, що була зроблена спроба подіяти нейтронами і на уран. Вчені сподівались, що, так само як і в інших елементів, в урану при цьому з'явиться β-активність і в результаті β-розпаду виникне новий елемент з номером на одиницю більшим, який і повинен був би зайняти 93-ю клітку в системі Менделєєва. Висловлено було припущення, що він повинен бути схожий на реній, і йому дали назву екареній (про це див. також стор. 527—530).

Перші досліди, здавалося, зразу ж підтвердили таке припущення. Навіть більше, виявлено було, що при цьому виникає не один новий елемент, а кілька. Були опубліковані повідомлення про виникнення зразу шести нових елементів, важчих за уран. Крім екаренію, були «виявлені» екаосмій, екаіридій, екаплатина і еказолото.

І все це виявилось помилкою. Але це була характерна помилка. Вона привела науку до найбільшого з досягнень фізики за всю історію людства — оволодіння енергією атомного ядра.

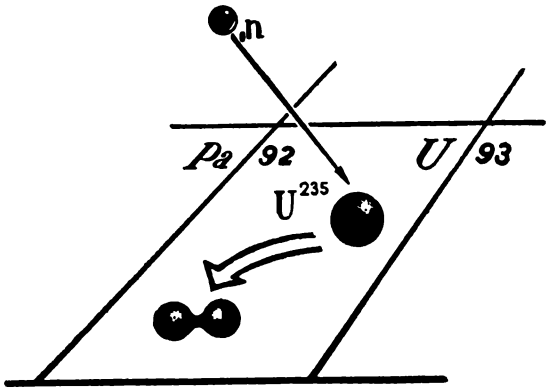


Рис. 5. При попаданні нейтрона в ядро урану-235 воно збуджується, в ньому виникають сильні коливальні рухи.

Виявилось, що все було не так. Ніяких трансуранових елементів знайдено не було. Серед дивовижних нових елементів, у яких марно намагались знайти гадані властивості, які повинні були мати елементи від екаренію до еказолота, раптом несподівано виявлені були радіоактивні барій і лантан. Не трансуранові, а найзвичайніші, місця яких знаходяться посередині періодичної таблиці Менделєєва.

Минуло чимало часу, раніше ніж цей дуже несподіваний і дуже дивний результат був правильно зрозумілий.

Чому з атомних ядер урану, який стоїть наприкінці періодичної системи елементів, при діянні нейтронів утворюються ядра елементів, місця яких знаходяться в її середині? Наприклад, було знайдено, що при діянні нейтронів на уран виникають елементи, що відповідають таким кліткам періодичної системи:

35 Бром і 57 Лантан
36 Криптон і 56 Барій
37 Рубідій і 55 Цезій
38 Стронцій і 54 Ксенон
39 Ітрій і 53 Йод
40 Цирконій і 52 Телур

та цілий ряд інших елементів.

Багато елементів знайдено було у надзвичайно складній суміші радіоактивних ізотопів, які утворюються в опроміненому нейтронами урані. Хоч усі вони виявились старими, давно відомими хімікам елементами, але в той же час це були нові речовини, вперше створені людиною.

У природі немає радіоактивних ізотопів брому, криптону, стронцію та інших елементів з числа тридцяти п'яти від цинку до європію, які утворюються при опромінюванні урану.

У науці часто так буває: найбільш загадкове і найбільш складне виявляється простим і ясним, коли його розгадали і зрозуміли. Виявилось, що при попаданні нейтронів в ядра урану останні розколюються, розщеплюються на два «осколки» — два атомних ядра меншої ваги. Ці осколки можуть бути різної величини, тому і утворюється так багато різних радіоактивних ізотопів звичайних хімічних елементів.

Одне атомне ядро урану (92) розпадається на атомні ядра брому (35) і лантану (57), осколки при розщепленні другого можуть виявитись атомними ядрами криптону (36) і барію (56). Кожного разу сума атомних номерів осколочних елементів, що утворюються, дорівнюватиме дев'яноста двом.

Це було початком ланцюга великих відкриттів, що змінюють долю людства. Незабаром було виявлено, що розщеплюються під ударами нейтронів тільки ядра атомів урану-235, якого в природному урані дуже мало (рис. 5 і 6). Виявилось, що при таких розпадах ядер урану, крім осколків — ядер з меншою атомною вагою, — щоразу виникають два-три нейтрони, кожний з яких в свою чергу здатний знову спричинити розщеплення атома урану. А при кожному такому розпаді виділяється дуже багато енергії. Це й було початком оволодіння людиною внутрішньоатомною енергією.

Серед величезної кількості осколкових продуктів розщеплення ядер урану згодом було виявлено перший справжній трансурановий елемент № 93, який залишався довгий час непоміченим (рис. 7 і 8). Він виникав при діянні нейтронів на уран-238. За своїми хімічними властивостями він був дуже схожий з ураном і зовсім не був схожий з ренієм, як цього чекали спочатку, при перших спробах синтезу елементів, важчих за уран. Тому його і не могли зразу виявити.

Перший створений людиною елемент, що лежить за межами «природної системи хімічних елементів» (рис. 8), створення якого розширило ці межі, визначені самою природою, дістав назву «нептуній», за ім'ям планети Нептун, передбачене відкриття якої розширило межі наших знань про сонячну систему. Тепер вже добуто дуже багато ізотопів нептунію. Серед них є і майже стійкий нептуній-237, його період піврозпаду перевищує два мільйони років. Нептуній можна тепер добувати в атомних котлах.

Незабаром створений був і 94-й елемент. Він також дістав ім'я, взяте з «неба», на честь останньої планети сонячної системи. Його на-

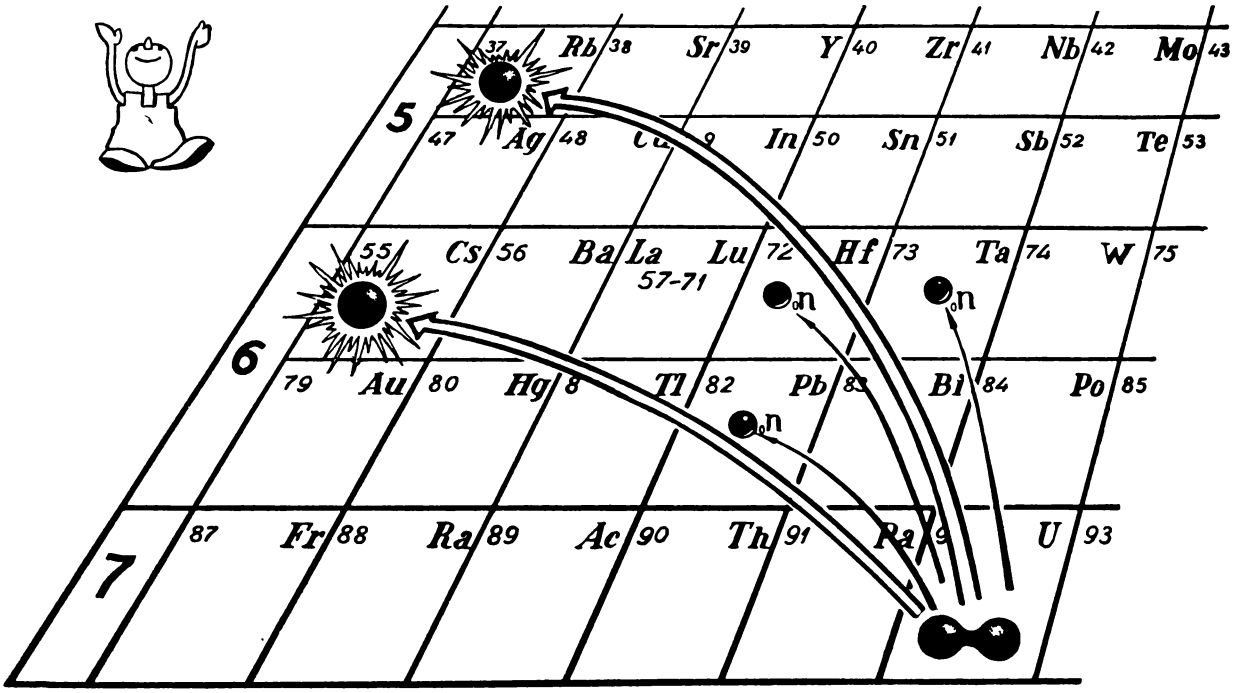


Рис. 6. Збуджене ударом нейтрона ядро урану-235 розколюється на дві частини, утворюються радіоактивні ізотопи елементів, що знаходяться в середині періодичної таблиці. При такому поділі урану-235 в нього вилітають 2—3 нові нейтрони, кожний з яких може спричинити розщеплення нового ядра урану-235.

звали плутонієм: у періодичній таблиці Менделєєва він іде по порядку за нептунієм, аналогічно останній планеті сонячної системи Плутону, орбіта якого лежить за орбітою Нептуна.

94-й елемент був виявлений точно у відповідності з законами побудови періодичної системи (рис. 9). Він виникає з першого штучного трансуранового елементу нептунію при його β-розпаді.

Плутоній — єдиний з трансуранових елементів, який тепер добувають в атомних котлах в дуже великих кількостях, Так само як і уран-235, він здатний розщеплюватись під дією нейтронів, і його вживають для виготовлення атомних бомб.

95-й і 96-й елементи мають назви «америцій» і «кюрій». Вони теж утворюються тепер в атомних котлах. Обидва ці елементи мають дуже велику радіоактивність — висилають α-проміння. Радіоактивність цих елементів настільки велика, що розчини їх солей нагріваються, закипають і дуже сильно світяться в темряві. Всі трансуранові елементи від нептунію до америцію і кюрію було добуто в досить великій кількості, щоб можна було докладно вивчити їх властивості. У чистому вигляді це метали сріблястого кольору, всі вони радіоактивні і за хімічними властивостями дуже схожі один на одного, а всі разом — на уран. Серед них спочатку сподівались знайти екареній, екаплатину, еказолото і т. д., але це не справдилось. Справа в тому, що, як гадають деякі вчені, починаючи з актинію, усі елементи мають однаково побудовані зовнішні електронні оболонки, і в міру збільшення атомного номера у них йде заповнення внутрішніх електронних оболонок, що робить їх схожими на рідкісноземельні елементи, які звичайно вміщують в одній клітці менделєєвської таблиці.

Усі нові, вперше створені людиною елементи точно підлягають періодичному законові.

Дуже цікавим елементом серед них є каліфорній — шостий після урану. Його, як і інших трансуранових елементів, на Землі немає. Каліфорній вперше був створений за методом, побудованим на періодичному законі: пластинка урану піддана була бомбардуванню в

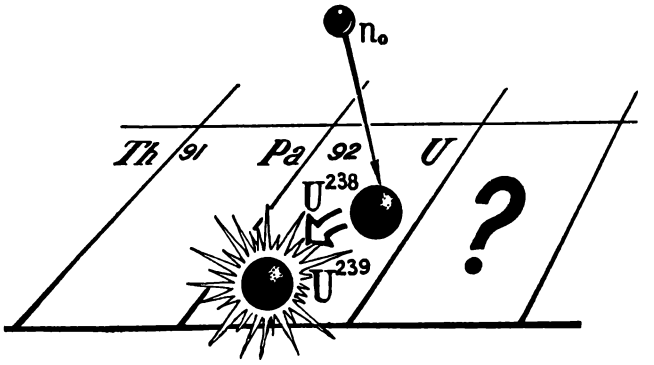


Рис. 7. Нейтрон, що попав у ядро урану-238, залишається в ядрі. Утворюється новий ізотоп урану — уран-239. Такого урану в природі немає. Це ізотоп з коротким життям, що має β-радіоактивність.

циклотроні ядрами вуглецю великої енергії (рис. 10). Чому при цьому повинен утворитись 98-й елемент каліфорній — розміркуйте самі. Рисунок вам у цьому допоможе.

Нещодавно виділений був у чистому вигляді і 97-й елемент — берклій. Для цього довелося покласти чистий препарат плутонію всередину ядерного реактора, де він перебував під дією потужного потоку нейтронів протягом цілих шести років. За цей час у ньому і нагромадилось кілька мікрограмів цього елементу. Після виймання з атомного котла плутоній розчинили в кислоті, після чого із суміші виділено було берклій-249, що живе найдовше. Він радіоактивний — за рік розпадається наполовину.

Поки що вдалося добути всього кілька мікрограмів берклію. Але цієї кількості вченим було досить, щоб точно вивчити його хімічні властивості.

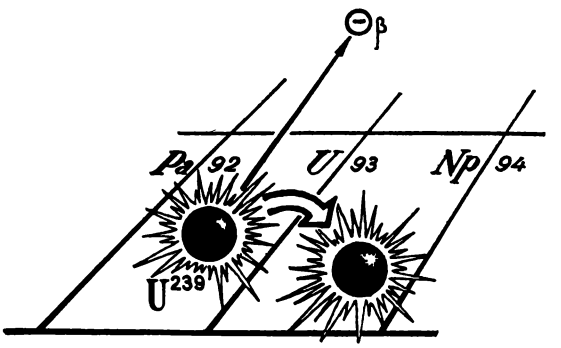


Рис. 8. При втраті однієї β-частинки уран-239 у відповідності з періодичним законом перетворюється в елемент № 93, перший трансурановий елемент — нептуній.

Дуже цікава історія відкриття двох дальших трансуранових елементів: 99-го і 100-го.

Вперше вони були знайдені у хмарах і в «грязі». Для того щоб вивчити, що утворюється при термоядерних вибухах, із хмари вибуху з допомогою літака зібрані були проби осаду на паперових фільтрах. В цьому осаді були знайдені сліди присутності двох нових елементів. Щоб дістати точніші дані, зібрано було на місці вибуху велику кількість «грязі»—зміненого вибухом грунту і гірської породи. Ця «грязь» була перероблена в лабораторії, і з неї були виділені два нові елементи. Їх назвали ейнштейнієм і фермієм на честь учених Ейнштейна і Фермі, яким людство має бути дуже вдячне за відкриття шляхів оволодіння атомною енергією: Ейнштейнові належить закон еквівалентності маси і енергії, а Фермі побудував перший атомний реактор.

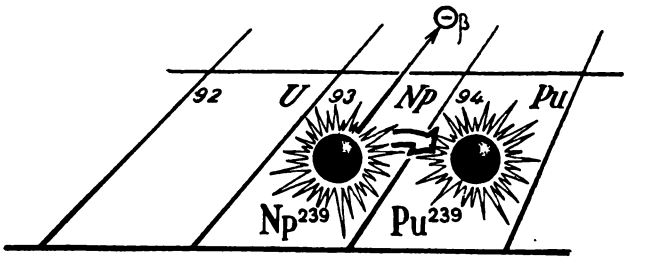


Рис. 9.

Знайдені і інші методи добування обох цих елементів, правда, поки що в настільки знікаюче малих кількостях, що навіть побачити їх поки що нікому не вдалося.

Але найбільшим досягненням, яким по справедливості може пишатись наука, слід назвати створення 101-го елементу, що дістав ім'я великого творця періодичної системи хімічних елементів, яка поклала початок оволодінню таємницями будови атома, — ім'я Дмитра Івановича Менделєєва.

Менделєвій було добуто так (рис. 11). На аркушик найтоншої золотої фольги було нанесено зовсім не видиме покриття, що складалось приблизно з одного мільярда атомів ейнштейнію. Альфа-частинки дуже великої енергії, пробиваючи золоту фольгу із зворотного боку, при співударі з атомами ейнштейнію могли вступати в ядернохімічну реакцію з утворенням атомів нового 101-го елементу. При такому співударі утворені атоми менделєвію вилітали з поверхні золотої фольги і збирались на другому, розташованому поряд

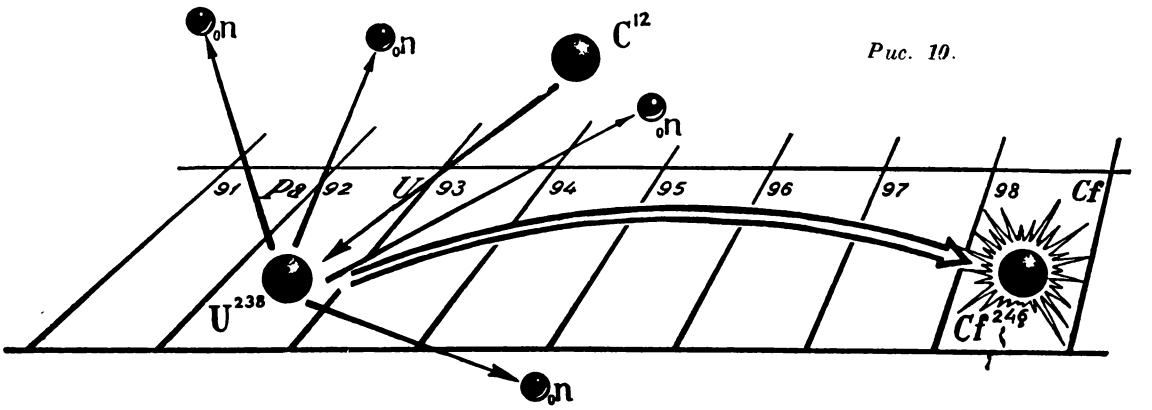


Рис. 10.

найтоншому золотому аркушику. Таким дотепним способом вдавалося виділити у чистому вигляді атоми 101-го елементу із складної суміші ейнштейнію і продуктів його розпаду. Невидимий наліт змивали кислотою і піддавали радіохімічному дослідженню.

Справді, це було чудо. Вихідним матеріалом для створення 101-го елементу в кожному окремому досліді служив приблизно один мільярд атомів ейнштейнію. Це дуже мало — значно менше однієї мільярдної частки міліграма, а добувати ейнштейній у більшій кількості було неможливо.

Заздалегідь було обчислено, що з усього мільярда атомів ейнштейнію при багатогодинному бомбардуванні альфа-частинками може прореагувати усього тільки один єдиний атом ейнштейнію і, отже, може утворитись тільки один атом нового елементу.

Потрібно було не тільки зуміти його виявити, потрібно було зробити це таким способом, щоб водночас з'ясувати тільки по одному атому хімічну природу елементу.

І це було зроблено. Успіх досліду перевершив розрахунки і сподівання. Вдалося помітити при одному експерименті не один, а п'ять атомів нового елементу. Цього виявилося досить для того, щоб встановити і факт утворення нового елементу, і його місце в періодичній системі, і його радіоактивні властивості (виявилось, що це альфа-активний елемент з періодом піврозпаду близько півгодини) і визначити його основні хімічні властивості.

Відкриття менделєвію — це вершина експериментальної майстерності вчених, це найбільше торжество періодичного закону і теорії будови атома. Це чудовий пам'ятник менделєєвській системі, яка протягом майже століття служила ключем до відкриття елементів.

Вже провадяться роботи по створенню дальшого, 102-го елементу, і можна бути впевненим, що він буде створений.

ЗАГЛЯНЕМО В МАЙБУТНЄ

Порожніх місць у менделєєвській таблиці більше немає. Всі вони вже заповнені. Усі елементи відкрито. Вже створено чимало нових, яких ніколи на Землі не бувало. На 101-у місці в періодичній таблиці стоїть тепер елемент, який носить славетне ім'я її творця.

Що ж, можливо, все вже зроблено? Може бути, могутня ідея Д. І. Менделєєва, яка протягом багатьох десятків років керувала розвитком хімії, завершила все, що вона могла дати, і для неї залишається тільки почесна роль повсякденної помічниці хіміків в їх буденній роботі?

Може бути, принцип періодичності, на якому побудована природна система хімічних елементів, обмежений тільки електронною оболонкою атомів?

Ні, це не вірно.

Коли великий учений починав свою роботу над природною системою хімічних елементів,

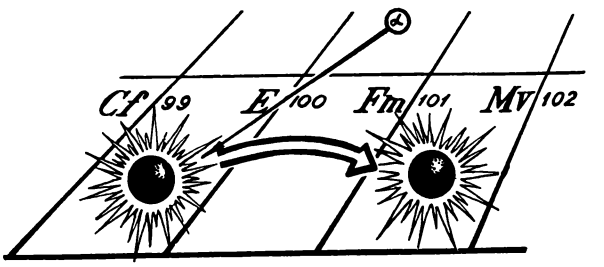


Рис. 11.

з 92 вивчено було 63, а про існування багатьох інших взагалі ніхто не підозрював.

Скільки ж елементів ми знаємо тепер? Скільки ізотопів відомо для кожного елементу? Скільки різних атомних ядер існує в природі? Скільки нових створено людиною?

Усього ми знаємо 101 елемент. Є підстава вважати, що швидко буде відкритий 102-й. Немає жодного елементу, в якого був би тільки один ізотоп. Одні елементи складаються з десятків різних сортів атомів, в інших їх менше. Є елементи, в яких взагалі немає стійких ізотопів; але немає жодного елементу, у якого не було б радіоактивних ізотопів.

Усього відомо понад 1400 різних атомних ядер для 101 елементу. Скільки ж із них створила природа і скільки створено людиною? Таке зіставлення приводить до несподіваного і дивного результату.

В природі знайдено для 92 елементів тільки 275 стабільних ізотопів і близько 50 радіоактивних.

15 радіоактивних ізотопів належать до ряду розпаду урану. В ряді торію теж п'ятнадцять. Тринадцять ізотопів в ряді розпаду урану-235. В усіх інших елементів відомі тільки сім радіоактивних ізотопів: це калій-40, рубідій-87, індій-115, лантан-138, самарій-147, лютецій-176, реній-187; неперервно утворюється в природі і зникає радіоактивний ізотоп вуглецю C^{14}. Ось і все! Правда, за останні роки виявлено було ознаки радіоактивності ще у 39 ізотопів різних елементів.

А тільки за два десятиліття, що минули від того часу, як знайдені були шляхи створення нових елементів, людина вже зуміла створити понад тисячу сто нових радіоактивних ізотопів, нових атомних ядер для всіх елементів без винятку.

Менделєєву відомі були 63 елементи, коли він встановив одну з найбільш загальних закономірностей природи — періодичність зміни хімічних властивостей елементу залежно від його атомної ваги.

Науці наших днів (1959 р.) відомі 1422 різні типи атомних ядер, 1422 різні ізотопи для 101 елементу.

Чи будуть встановлені коли-небудь якісь загальні закономірності у тих властивостях речовини, які залежать тільки від атомного ядра? Це дуже велике і принципово важливе питання. Від відповіді на нього залежить майбутнє людського пізнання природи. Відповідь на нього — це шлях до пізнання будови атомного ядра, сьогодні багато в чому ще недоступного. Але ми вже можемо сказати, що це наука зробить. І початок відповіді на це найважливіше питання, розв'язання якого дасть наука майбутнього, намічається в періодичній таблиці атомних ядер.

Подивіться уважно на початкову частину таблиці (стор. 593), яку можна назвати прообразом періодичної таблиці майбутнього.

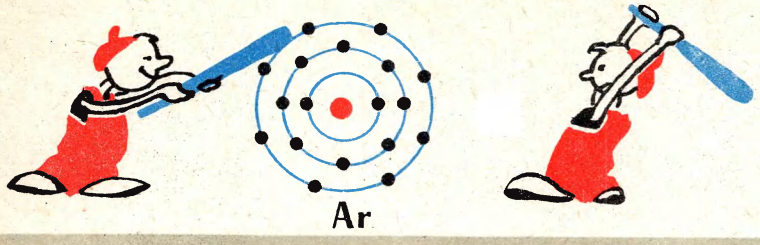
Це по суті та сама періодична таблиця, але в кожній клітці її наведені всі атомні ядра, відомі для того чи іншого елементу. Цілком надрукувати її тут не можна — вона надто громіздка. Тут зображено тільки її початок від водню до кальцію. У ній наводяться всі ізотопи усіх відомих в наші дні елементів — як природні, так і штучні. В строкатому її узорі розібратись не важко. Квадратиками в ній позначено стабільні ядра, кружечками із стрілкою — β-активні; у ядра, що висилає при β-розпаді електрони, стрілка спрямована донизу; якщо ж ядро висилає при β-розпаді позитрони, то стрілка спрямована вгору. Усі ядра з позитронним розпадом створені штучно, в природі їх не було.

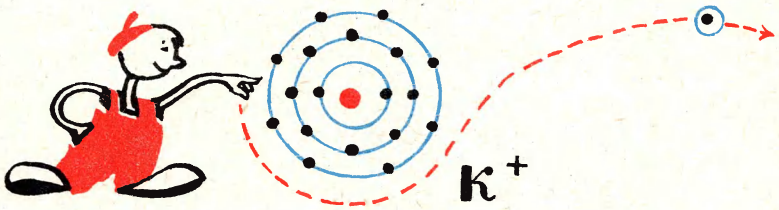
Кожний елемент займає у цій таблиці свій стовпець. Номер стовпця відповідає зарядові ядра — порядковому номеру елементу. Атомні ядра різних елементів з рівною атомною вагою, або, точніше сказати, з однаковими масовими числами (такі ядра називають ізобарами), вміщені між паралельними похилими лініями.

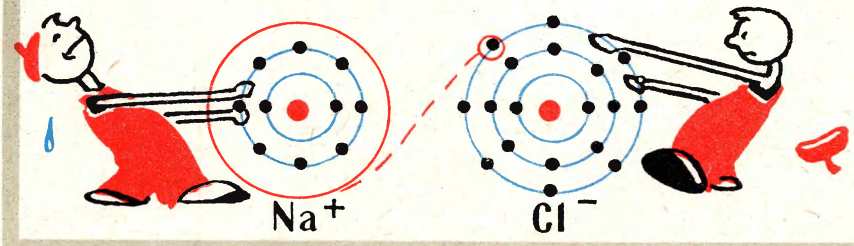
Наприклад, стовпець № 16 займає сірка.

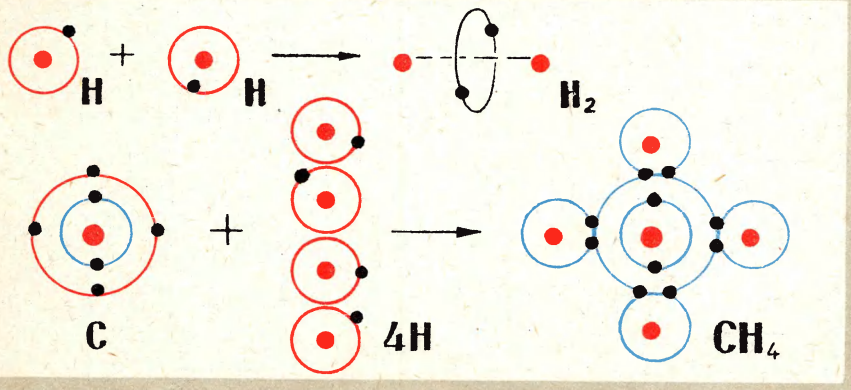
Таблиця 37. У верхній частині рисунка зображено початок періодичної системи. Для трьох перших періодів наведені схеми електронних оболонок атомів. Зверніть увагу, що загальне число електронів відповідає порядковому номеру елементу, а число електронів зовнішньої, валентної, оболонки дорівнює номеру групи, в якій знаходиться елемент в таблиці Д. І. Менделєєва (на схемі позначено червоним кольором). Стійкі електронні оболонки газів гелію, неону, аргону зберігаються в будові атомів елементів усіх дальших періодів, утворюючи їх внутрішні електронні оболонки (вони показані голубим кольором). Внизу зображено будову атомів трьох елементів, що займають разом одну клітку в періодичній системі: заліза, кобальту і нікелю. Вони знаходяться в середині довгого четвертого періоду. У них зовнішні електронні оболонки однакові, у кожного на цих оболонках по два електрони. Тому їх хімічні властивості дуже близькі. Але в хімічних реакціях у цих елементів можуть брати участь і електрони, що знаходяться на глибшій електронній оболонці. Вона у них ще не добудована. На ній може знаходитись найбільше десять електронів, а на зовнішній — вісім. Обидві вони заповнюються тільки у 36-го елементу — благородного газу криптону.

I
II
III
IV
V
VI
VII
VIII
O
1
2
3
1 H
2 He
3 Li
4 Be
5 B
6 C
7 N
8 O
9 F
10 Ne
11 Na
12 Mg
13 Al
14 Si
15 P
16 S
17 Cl
18 Ar
26 Fe
27 Co
28 Ni


Ar


K+


Na+
Cl−


H
H
H2
C
4H
CH4

Для неї відомі ізотопи з β^+-активністю (S^{31}); стійкі ізотопи: S^{32}, S^{33}, S^{34}, S^{36} і ізотопи з β^--активністю: S^{35}, S^{37}. Похилий стовпець для масового числа 32 указує, що одну і ту саму атомну вагу мають ізотопи: Si^{32}, P^{32}, S^{32}, Cl^{32}.

Зверніть увагу на товсту чорну лінію, яка проходить по середині таблиці. Зубчастою рискою вона з'єднує стійкі ізотопи суміжних елементів. Придивіться: в усіх ядер, розташованих під цією рискою, стрілки спрямовані вгору, а над нею — вниз. Вона поділяє позитронну і електронну β-нестійкість атомних ядер.

Дуже багато надзвичайно цікавих даних містить таблиця атомних ядер, але ще більше вона приховує в собі. Можна бути впевненим, що навіть уявити собі важко, скільки таємниць буде розкрито і якими неосяжними можливостями вона допоможе оволодіти науці.

В таблиці атомних ядер чітко виражено одну чудову закономірність, вона зразу впадає в око. Придивіться до таблиці уважно, і ви самі помітите різницю між парними і непарними елементами.

Кожний непарний елемент, починаючи з фтору, має тільки один (іноді два) стійкий ізотоп, а всі парні мають по кілька стійких ізотопів. Наприклад, у фтору — дев'ятого елементу — є один нерадіоактивний ізотоп, але зате у його сусідів з обох боків (у восьмого — кисню і десятого — неону) їх по три.

Цю загадкову закономірність можна простежити в усій таблиці для всіх елементів.

Як приклад можна вибрати вже відому нам тріаду: залізо — кобальт — нікель. Для парного заліза відомі чотири стійкі ізотопи, для парного нікелю — п'ять, а для непарного кобальту — тільки один.

Очевидно, що із закономірністю чергування стійкості парних і непарних ядер зв'язана і чудова закономірність поширеності парних і непарних елементів у земній корі і в усьому Всесвіті.

Але не слід гадати, що цим і обмежується періодична закономірність, що виявляється в таблиці атомних ядер.

Систематичне дослідження властивостей величезної кількості стабільних і радіоактивних ядер усіх природних і штучних ізотопів приводить до чудового висновку про існування в атомному ядрі енергетичних рівнів, подібно до того, як існують енергетичні рівні у зовнішніх електронних оболонках атомів.

З курсу фізики ви знаєте, що атомні ядра побудовані з протонів — ядер атомів водню, які несуть позитивний заряд, і нейтронів, маса яких майже точно дорівнює масі протона і які не мають заряду.

Зіставлення найрізноманітніших властивостей ізотопів, які залежать від атомного ядра, з числом нейтронів або протонів, що входять до його складу, приводить до висновку, що в ядрах існують нейтронні і протонні оболонки і існують періоди в будові атомних ядер, так само як існують періоди в будові атомних оболонок. І якщо електронні оболонки стають особливо стійкими, коли вони містять 2 (гелій), 10 (неон), 18 (аргон), 36 (ксенон) і 86 (радон) електронів, то внутрішньоядерні нейтронні і протонні оболонки стають найстійкішими, коли в атомних ядрах міститься 2, 8, 20, 50, 82 або 126 протонів чи нейтронів. Ці дивовижні числа — вони недарма дістали назву «магічних» чисел — визначають стійкість атомних ядер і особливу періодичність у зміні їх фізичних властивостей. Ізотопи з магічними числами протонів або нейтронів мають особливо високу

Таблиця 38. На верхньому рисунку зображено схему будови атома благородного газу аргону. Він має три закінчені електронні оболонки: найглибшу — гелієву, на ній два електрони; середню — схожу з електронною оболонкою неону — і крайню — зовнішню оболонку аргону — по вісім електронів на кожній. Усі три оболонки дуже міцні. Їх дуже важко зруйнувати. При звичайних хімічних впливах вони залишаються незмінними. Тому благородні гази майже не вступають в реакції і не утворюють хімічних сполук. На другому рисунку зображено будову атома металу калію. На зовнішній електронній оболонці у нього тільки один електрон. Він дуже слабо зв'язаний з атомом і легко може відриватись, навіть при слабких впливах. Позитивний іон калію, що утворився, дуже міцний, він побудований так само, як атом благородного газу. На третьому рисунку зображено схему хімічної реакції між натрієм і хлором. Атом металу натрію легко втрачає свій єдиний зовнішній валентний електрон. Його захоплює атом хлору, у якого в зовнішній оболонці не вистачає одного електрона. Утворюються два іони: позитивний натрію і негативний хлору. Обидва вони схожі з атомами благородних газів. Величезні сили електричного притягання, що виникають між ними, обумовлюють велику міцність хімічної сполуки — кристалів хлористого натрію, усім відомої кухонної солі. На нижньому рисунку показано схеми утворення молекули водню з двох водневих атомів і молекули газу метану з чотирьох атомів водню і одного вуглецю. При цих реакціях теж виникають структури спільних електронних оболонок з електронів, що належали різним атомам, аналогічні стійким оболонкам благородних газів.

поширеність в природі, особливо велике число стабільних електронів, вони найстійкіші щодо захоплення нейтронів при ядерних реакціях, вони найміцніші, цілком подібно до того, як найміцніші атоми благородних газів. Дослідження таких властивостей атомних ядер, як магнітні властивості, абсолютна поширеність, дефект маси ядра, енергія зв'язку, радіоактивність, показує, що в них спостерігаються періодичні зміни з періодами, обумовленими наявністю в деяких ядрах магічного числа протонів або нейтронів. На цих стійких ядрах закінчуються періоди в таблиці атомних ядер аналогічно тому, як у таблиці хімічних елементів періоди закінчуються на стійких атомах благородних газів.

На початковій ділянці таблиці атомних ядер намічено три перших магічних числа: 2, 8 і 20.

Рано ще говорити, що вже існує періодична система атомних ядер, але великий закон Менделєєва про періодичну закономірність у властивостях хімічних елементів явно виявляється справедливим не тільки для зовнішньої електронної оболонки атома, але й для атомного ядра, так недавно ще недоступного для дослідника.

Це вказує на те, що можливості, вміщені в періодичному законі, невичерпні.

Можна бути впевненим, що в найближчі роки створена буде періодична система атомних ядер, виявлені будуть глибокі закономірності, які зв'язують властивості ядра з його кількісними характеристиками.

У руках хіміків сьогоднішнього дня періодична таблиця елементів служить могутньою зброєю у боротьбі за створення нових хімічних речовин із заздалегідь заданими властивостями, потрібними людині. Подібно до цього періодична система атомних ядер для хіміка майбутнього стане першим ступенем на шляху до здійснення спрямованого синтезу нових елементів з небаченими властивостями — тих, які потрібні будуть людині майбутнього.

ПЕРІОДИЧНИЙ ЗАКОН І ХІМІЯ ВСЕСВІТУ

Чи не обмежуються роль і значення закону Менделєєва тільки галуззю хімії? Можливо, він важливий і потрібний тільки хімікам? Він допомагає їм пізнавати хімічні властивості речовини, дає змогу створювати нові сполуки з незвичайними і дивовижними властивостями. Але чи потрібний він біологам, які вивчають життя, геологам, які проникають у глиб земної кулі, астрономам, які відкривають таємниці світобудови? Можливо, їх він мало цікавить, чужий їм, далекий, так само як далека зірка, що сяє на небосхилі, від пробірок і колб в лабораторії хіміка?

Ні, це не так.

Можна знайти багато прикладів, що показують значення цього великого періодичного закону у найрізноманітніших галузях знання, які вивчають найрізноманітніші галузі і сторони світу. Цілком очевидно, що він потрібний школяреві, який тільки починає вивчати хімію. А якщо сивоволосий академік перестав заглядати в таблицю Менделєєва, то це просто тому, що він давно знає її напам'ять.

ХІМІЯ ЗЕМЛІ

Що найважливіше для геологів, які досліджують нашу планету? Звичайно, знання найзагальніших законів, що визначають поведінку речовини як на поверхні, у земній корі, так і в глибинах земної кулі. Геолог не може шукати наосліп. Він наперед повинен знати, де він може знайти залізо, де — уран, де — фосфор, вуглець (алмази) і т. д. Він повинен знати, які елементи є супутніми в земній корі, повинен знати закони утворення сумісних родовищ різних елементів.

Періодичний закон є основою найбільш важливих, найширших геохімічних узагальнень, якими керуються геологи у своїх шуканнях нових родовищ того чи іншого елементу. У найбільш складних, найграндіозніших хімічних процесах, які відбувались протягом сотень мільйонів років у земній корі і тривають у наші дні, схожі за своїм положенням у періодичній системі елементи мають схожу геохімічну долю. Це дозволяє хімікам простежити їх рух у земній корі і з'ясувати закони, що керують їх поширенням на поверхні земної кулі.

Геологи знають, наприклад, де вони повинні шукати дуже важливі і потрібні для сучасної техніки метали осмій і іридій. Вони знаходяться у земній кулі завжди разом з платиною, так само як у періодичній таблиці Менделєєва вони стоять поряд, у восьмій групі.

Ми вже знаємо, що кобальт і нікель є супутніми у своїх родовищах із залізом і разом з ним знаходяться в таблиці.

Геохімічна поведінка різних елементів визначається насамперед будовою зовнішніх електронних оболонок їх атомів. Ті з них, які мають закінчені зовнішні електронні оболонки, — благородні гази, які не вступають у хімічні сполуки, — існують тільки в земній атмосфері. Навіть гелій і радон, що утворились при розпаді радіоактивних елементів, не тільки залишаються полоненими у гірських породах, але й безперервно надходять в атмосферу.

Елементи, розташовані в коротких періодах і на початку і в кінці кожного з довгих періодів таблиці, утворюють основну товщу земної кори. Це з них складається основна маса силікатних гірських порід. Елементи, що стоять у періодичній системі в середині довгих періодів, утворюють рудні, найчастіше сульфідні, родовища. Багато з цих елементів зустрічається і в самородному стані (див. кольорову таблицю на стор. 593).

Періодична система елементів допомагає геохімікові встановлювати загальні закономірності у взаємному співіснуванні різних елементів у гірських породах і рудах. Вона дає можливість геологові знаходити в товщі земної кори родовища корисних копалин.

ХІМІЯ МЕТЕОРИТІВ

Величезне значення для пізнання світу має проблема кількісного співвідношення між атомами різних елементів. Яких атомів у світі більше? Це питання дуже важливе і для розв'язання загадки походження елементів — загадки взаємного перетворення речовини у світобудові, і для розв'язання найважливішого питання усього природознавства — питання про походження і розвиток зоряних світів.

У наші дні наука вже зуміла знайти шляхи підходу до розв'язання цих великих питань. І ці шляхи теж не можуть обійти періодичний закон. Теорія утворення елементів, розвинута на основі дослідження фізики атома, приводить до дуже важливого висновку, що відносна поширеність атомів того чи іншого елементу у Всесвіті визначається зарядом ядра, тобто його номером у періодичній системі елементів Менделєєва. Отже, така властивість елементу, як поширеність у світобудові, визначається будовою його атомних ядер, законами їх утворення і перетворення, законами нової, що зароджується у наші часи, хімії майбутнього — ядерної хімії.

І що найразючіше, ядерна хімія вже відкрила існування дивовижних, «магічних» закономірностей, які вказують на ще невідомий періодичний закон у будові атомних ядер різних елементів. Цей загадковий закон виявляється у періодичній залежності стійкості атомних ядер від порядкового номера елементу в періодичній системі Менделєєва.

Періодична закономірність у хімії ядерних перетворень дуже схожа із законом періодичної зміни хімічних властивостей елементів, який був відкритий Менделєєвим. Періодичний закон Менделєєва привів науку до розкриття таємниці будови зовнішніх частин атома. Безперечно, що «магічна» закономірність у властивостях атомних ядер теж чекає нового Менделєєва, який тепер, можливо, ще тільки читає цей том Дитячої енциклопедії.

Але вже і в наші дні ядерна хімія приводить до дуже цікавих і важливих результатів. Одним з найважливіших є створення теорії поширеності хімічних елементів. Вона побудована на вченні про стійкість атомних ядер і ймовірність їх утворення.

Ця теорія приводить до висновку, що відносна кількість атомів кожного елементу у світі залежить від його положення в періодичній таблиці — від його атомного номера. І поширеність елементів теж являє собою дуже цікаву і дивну періодичну залежність: у світі переважають атоми з малими номерами, що стоять на початку періодичної таблиці; атомів елементів з парними порядковими номерами у світі більше (86%), ніж їх сусідів — елементів з непарними номерами (14%).

Вчені-геохіміки досліджують склад земної кори, вивчають закони, які керують рухом елементів протягом мільйонів років тих геологічних епох, коли утворились поклади залізних руд, вугільні пласти, золоті розсипи, родовища алмазів. Їм конче потрібно знати загальні запаси кожного елементу на земній кулі. Вони проробили тисячі і тисячі аналізів гірських порід і мінералів. Вони знайшли чудові способи оцінювати потужність пластів, утворених гірськими породами, визначати, скільки важать гірські хребти, яка товщина материків, скільки води в океані, скільки її у хмарах і тучах, скільки солі в усіх морях і скільки в них золота.

Геохіміки зуміли скласти чудову таблицю, що показує запаси кожного з хімічних елементів на Землі.

Це дуже цікава таблиця. З неї видно, що левова пайка за складом земної кулі припа-

дає усього на шість найбільш поширених елементів: залізо, кисень, кремній, магній, алюміній, кальцій.

Разом узяті, вони складають 94% нашої планети за вагою. Найбільш поширені кисень і залізо, їх у 1 000 000 000 000 000 раз (10^{15}) більше, ніж найрідкісніших елементів, наприклад полонію чи актинію.

Якщо порівняти наявні на всій Землі кількості заліза, кобальту і нікелю — елементів, які стоять поряд у восьмій групі періодичної системи, то виявиться, що земна куля складається із

заліза (атомний номер 26) на 36,9%,
кобальту (атомний номер 27) » 0,2%,
нікелю (атомний номер 28) » 2,9%.

У заголовку цього розділу було вказано, що мова йтиме про хімічний склад метеоритів, а досі йшлося про склад земної кулі. Але, по-перше, Земля — теж небесне тіло, і, по-друге, потрібно знати хімічний склад Землі, щоб порівняти його із складом метеоритів, які прилітають до нас на Землю з таємничих глибин космічного простору.

Найточніші хімічні аналізи величезної кількості метеоритів, що впали на нашу планету, дали чудові результати. Виявилось, що коли підрахувати середній вміст в усіх метеоритах найбільш поширених на землі елементів: заліза, кисню, кремнію, магнію, алюмінію, кальцію, — то на їх частку припадає рівно 94%, тобто їх у складі метеоритів рівно стільки ж, скільки у складі земної кулі.

Крім того, з'ясовано, що у залізних метеоритах

заліза 91,0%,
кобальту 0,6%,
нікелю 8,4%.

Якщо порівняємо ці числа з відносним поширенням цих елементів на земній кулі, наведеним вище, то побачимо разючий збіг: виявляється, що на Землі з цих трьох елементів припадає на

$$\text{залізо } 92\% = \frac{36{,}9}{36{,}9 + 0{,}2 + 2{,}9},$$

кобальт 0,5%,
нікель 7,5%,

тобто і на Землі, і в метеоритах ці елементи перебувають приблизно в однакових співвідношеннях. Ці і багато інших виявлених збігів дали вченим підставу зробити висновок: речовина на Землі і речовина у небесному просторі однакова. Вона складається з одних і тих самих елементів. Кожний з елементів і на Землі, і в метеоритах має майже однаковий ізотопний склад. Наприклад, неодноразові аналізи ізотопного складу сірки, добутої з попелу і лави численних вулканів, що є в різних частинах земної кулі, показали, що сірка однакова скрізь. Всюди відношення між кількостями стабільних ізотопів сірки-32 і сірки-34 одне і те саме. Воно дорівнює 22,200. Ізотопний склад сірки з метеоритів — єдиних представників Космосу, доступних для безпосереднього вивчення, цілком такий самий, як і на Землі: $\frac{S^{32}}{S^{34}} = 22{,}200$. Далі виявилось, що найбільш поширені елементи одні і ті самі. Навіть співвідношення між ними і тут і там одне і те саме. Чергування елементів з парними і непарними порядковими номерами в періодичній таблиці теж зберігається однакове і тут і там. Можна було б, звичайно, навести ще дуже багато прикладів, які показують велику схожість у поведінці хімічних елементів на Землі і в космічному просторі, помітити ще дуже багато загальних закономірностей.

Чи може це бути випадковим? Звичайно, ні.

Звідки б не прилітали до нас на Землю випадкові гості із Всесвіту — можливо, це частини комет, які належали до сонячної системи; можливо, це уламки малих планет; можливо, це вісники з чужого зоряного світу, — важливе одне: за своїм хімічним складом, за співвідношенням між елементами, за тими хімічними сполуками, які знайдені в метеоритах, вони дають нам знати, що діяння великого закону Менделєєва не обмежується границями нашої планети. Він є єдиним для всього Всесвіту, де можуть існувати атоми з їх електронною оболонкою. Матерія скрізь єдина.

ХІМІЯ ПЛАНЕТ

Про хімічний склад планет відомо поки що дуже мало. Ще менше знаємо ми про хімічні процеси на них. Але дещо все-таки відомо. Ми знаємо, наприклад, що в цих дивовижних світах існують найпростіші, найзвичайніші, з погляду хіміка, хімічні сполуки.

В атмосфері Венери знайдено значний вміст вуглекислого газу (CO_2).

В атмосферах планет-гігантів — на Юпітері і Сатурні — виявлені: метан (CH_4) і аміак (NH_3).

Більш ніж усі інші планети, схожий на Землю Марс: на ньому є вода, в його атмосфері теж виявлено вуглекислий газ. Усі ці сполуки є найбільш характерними для елементів вуглецю, азоту, кисню у відповідності з положенням їх у періодичній таблиці Менделєєва.

ХІМІЯ СОНЦЯ

Важко навіть уявити, що людина може вивчити хімію Сонця. Але зробити це можна. Ми знаємо тепер хімічний склад Сонця: знаємо (і навіть вже досить багато знаємо) про ті грандіозні процеси, що є джерелами сонячної енергії.

Про це все нам дають знати сонячні промені. З допомогою спектрального аналізу на Сонці знайдено було понад шістдесят елементів періодичної таблиці Менделєєва, тих самих, що є і на нашій планеті. Напевно, знайдені будуть і інші.

Вдалося навіть визначити і кількісні співвідношення між ними. Виявилось, що Сонце — це світ страшних, жахливих бур розжареного водню. Водневих атомів на Сонці майже у п'ять раз більше, ніж атомів гелію, і в тисячу раз більше, ніж атомів усіх інших елементів, взятих разом.

Серед інших елементів на Сонці переважають вуглець, азот і кисень. На Сонці знайдено залізо. Є там і ті елементи, які найбільш поширені на Землі: кремній, магній, алюміній, кальцій. Є також калій і натрій. Знайдено навіть золото.

Знайдені і найпростіші хімічні сполуки, молекули яких здатні витримати дуже високу температуру Сонця. Це не які-небудь особливі, «сонячні» хімічні сполуки — ні, хіміки вміють їх добувати і досліджувати на Землі. Це найпростіші радикали: CN, OH, CH, NH. Більш складні молекули, мабуть, на Сонці існувати не можуть.

Очевидно, хімія Сонця дуже проста, якщо говорити про стару хімію — хімію електронних оболонок атома. Але на Сонці відбуваються процеси ядерної хімії, причому у таких грандіозних розмірах, що неможливо навіть підібрати відповідні слова, щоб описати їх. Хімія Сонця є по суті першим прочитаним розділом хімії майбутнього.

Що ж відбувається на Сонці (і, звичайно, на багатьох зірках, схожих на наше Сонце)? Яких перетворень зазнають атомні ядра елементів на Сонці? І в цьому нам допомагає розібратись періодична таблиця Менделєєва.

У надрах Сонця при дивовижно високих температурах і тиску атоми багатьох елементів втрачають майже всі свої електрони. В умовах стиснутого до величезної густини газу ядра водню — протони — вступають в ядернохімічні реакції.

Сонце — це світ водню. Ядра інших елементів оточені з усіх боків протонами — ядрами водню. Атоми всіх елементів, що існують на Сонці, можуть стикатися майже тільки з ядрами водню. Усі інші зіткнення відбуватимуться значно рідше. Якщо швидкості і енергії атомних ядер, що стикаються, досить великі, то при зіткненні відбудеться злиття обох ядер, ядерна реакція і виникне новий елемент.

Цілком імовірно, що на Сонці відбувається багато різноманітних ядерних реакцій. Далеко не всі вони вивчені. Про багато з них ми ще і не підозрюємо. Але деякі з них відомі, і, можливо, вони саме і є найважливішими, тими, що визначають природу Сонця.

Одна з них має особливе значення. Завдяки цій реакції Сонце є Сонцем. Це реакція між вуглецем і воднем. Вона відбувається не зразу, а за кілька ступенів. Перша стадія цієї сонячної реакції — це сполучення ядер водню з ядрами вуглецю, звичайного вуглецю, того самого, якого найбільше на нашій Землі, — ізотопу вуглецю C^{12}. При цьому виникає нове атомне ядро з сімома позитивними зарядами. Адже в ядрі атома вуглецю їх шість, а з протоном додається ще один. Атомна вага нового ядра збільшується на одиницю (рис. 12). З цим атомним ядром вчені обізнані, вони вміють добувати його штучним способом на Землі.

Згідно з правилом зсуву, елемент при збільшенні заряду ядра на одиницю перетворюється в інший, що займає в системі Менделєєва дальшу за порядком клітку. Вуглець перетворює-

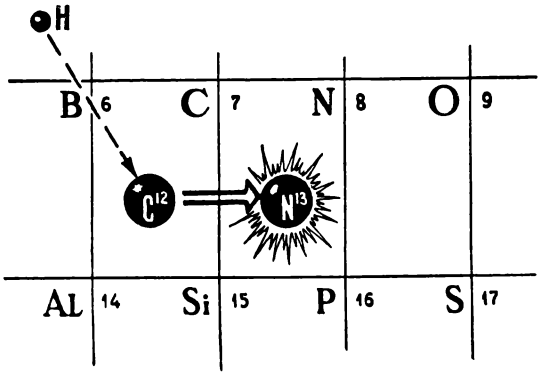


Рис. 12.

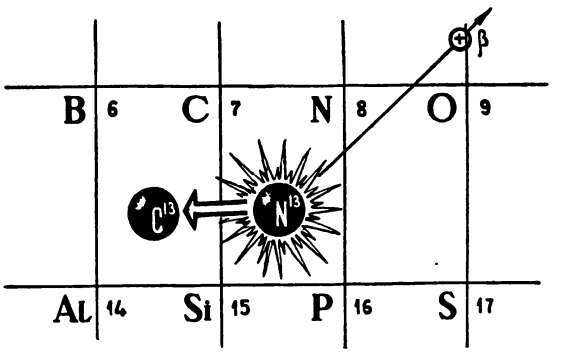


Рис. 13.

ться в радіоактивний ізотоп азоту N^{13}. Період його життя невеликий: за десять хвилин він розпадається наполовину, викидаючи позитрон (позитивний електрон), і перетворюється знову у вуглець. Але при цьому вже

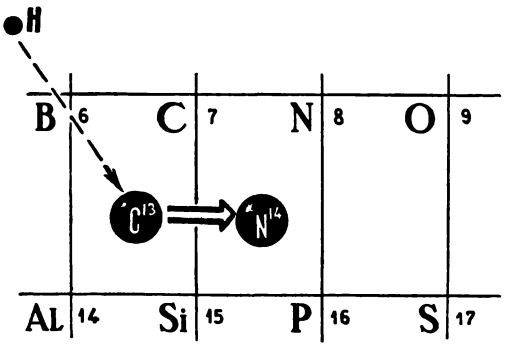


Рис. 14.

утворюється важкий ізотоп вуглецю C^{13} (рис.13). Не слід гадати, що це якийсь особливий, «сонячний» вуглець. Ні, його багато і на Землі; він цілком стійкий, і в земному вуглеці ізотопу C^{13} близько одного процента.

В результаті двох послідовних реакцій вуглець перетворюється у вуглець таки, але в інший ізотоп, з вищою атомною вагою. Це ядро важкого вуглецю C^{13}, знову зазнаючи ударів протонів, може злитися з тим із них, який матиме найбільшу енергію. При цьому, як і випливає з періодичного закону, знову виникне ядро азоту, але вже з більшою атомною вагою (рис. 14). На цей раз це буде ядро атома азоту N^{14}, який становитиме майже всю масу земного атмосферного азоту.

Які б елементи не існували і не виникали знову в ланцюгу ядернохімічних перетворень, на Сонці доля їх визначена наперед. Їм доведеться знову і знову брати участь у протонних перетвореннях. Вони можуть стикатися майже тільки з протонами: адже на Сонці найбільше водню.

При злитті ядер азоту N^{14} і водню, згідно з правилом зсуву в періодичній системі, повинно виникнути ядро легкого кисню O^{15} (рис. 15). Цього ізотопу на Землі немає, але фізики вміють його добувати. Він радіоактивний і зникає за короткий час. За дві хвилини розпадається половина його атомів. При розпаді він висилає позитрон і знову, вже втретє, перетворюється в азот, але на цей раз у важкий ізотоп азоту N^{15} (рис. 16). Це стабільний ізотоп азоту, він є у невеликій кількості в нашому звичайному азоті.

При впровадженні протона ядро N^{15} зразу розпадається, викидаючи α-частинку — ядро атома гелію, — і перетворюється... в ядро самого звичайного ізотопу вуглецю—C^{12} (рис. 17).

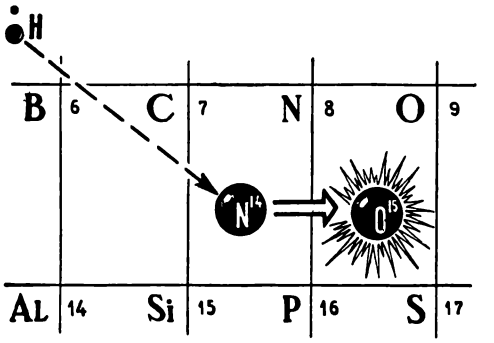


Рис. 15.

Атомне ядро вуглецю C^{12} в результаті чотирьох послідовних ядерних реакцій з протонами, тричі перетворившись в азот, один раз у кисень, один раз у важкий вуглець, викинувши по дорозі два позитрони і одну α-частинку, перетворюється знову у той самий ізотоп вуглецю — C^{12}. В результаті вуглець залишився таким самим, яким він і був. Але зникли чотири водневих ядра і утворилось ядро атома гелію.

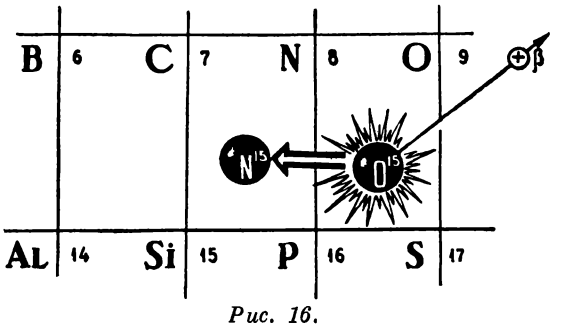


Рис. 16.

На Сонці ядро вуглецевого атома є тією основою, на якій із чотирьох протонів, що послідовно приєднуються, формується ядро атома гелію. Це і є кінцевим підсумком сонячного процесу. Можна, мабуть, сказати, що паливом Сонця служить водень, а золою, відходом, — гелій.

Довго, неймовірно довго триває описаний цикл: повинно минути майже п'ять мільйонів років, поки атом вуглецю після всіх послідовних перетворень стане знову атомом вуглецю. Це відбувається тому, що не кожне зіткнення з протоном спричиняє реакцію. Потрібні мільйони років, щоб серед незліченної безлічі зіткнень з протонами, яких зазнають ядра вуглецю, сталося зіткнення з таким швидким протоном, який здатний проникнути у маленьку неприступну фортецю — атомне ядро.

З такою швидкістю (за п'ять мільйонів років одне повне перетворення!) ці реакції можуть йти тільки при величезних температурах, не нижче 20 мільйонів градусів. Але температура поверхні Сонця не перевищує 6000°. Це означає, що таємниця Сонця захована в його центральних ділянках, де, як гадають учені, панують дивовижно високі температури, близькі до 20 мільйонів градусів.

Не слід гадати, що усе щойно викладене — це лише припущення. Усі стадії цього великого сонячного ядернохімічного процесу фізики вже повторили в своїх лабораторіях. У прискорювачах вони змогли добути ядра водню — протони — з такими великими енергіями, які перевищують можливу їх енергію при 20 мільйонах градусів на Сонці. Вченим — фахівцям з ядерної хімії — не потрібно чекати мільйони років, щоб здійснити найповільнішу стадію з цього циклу.

Спектроскопісти зуміли визначити, скільки вуглецю на Сонці. Вони виміряли, скільки в ньому важкого ізотопу C^{13}. Фізики обчислили швидкість цієї реакції, знайшли, скільки енергії виділяється при кожному повному циклі, що відбувається з одним атомом, і виявилось, що при 20 мільйонах градусів і при тій кількості вуглецю C^{13}, яку знайдено на Сонці, повинно утворюватись саме стільки енергії, скільки Сонце її висилає. Про те, як фізики обчислили, скільки енергії утворюється при реакції синтезу гелію з водню, ви можете прочитати у статті «Термоядерні реакції в природі і техніці».

Тепле, ласкаве проміння сонечка, в якому ви грієтесь і засмалюєтесь влітку, розповіло багато чудесного про таємниці загадкових про-

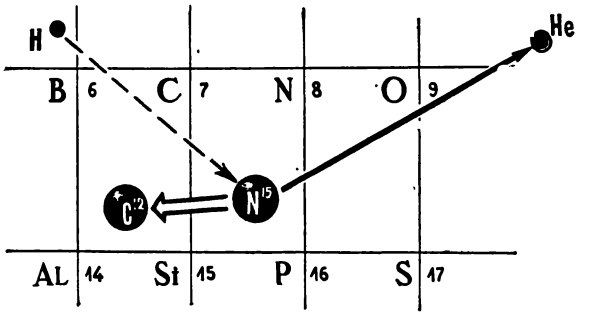


Рис. 17.

цесів, що відбуваються за мільйони кілометрів від нашої Землі. Але ми ще не все зрозуміли, не все вивчили. Багато й дуже багато залишається на вашу долю, майбутні вчені — юні читачі Дитячої енциклопедії.

МІЖЗОРЯНИЙ ПРОСТІР

Важко передбачити шляхи розвитку науки. Навіть найгеніальніший учений, що зумів узагальнити досвід багатьох поколінь своїх попередників в єдиній великій ідеї, у великому відкритті, неспроможний передбачити дальшу його долю. Наука розвивається часто такими складними і звивистими шляхами, що навіть важко буває простежити і зрозуміти можливий зв'язок і послідовність у неперервному ланцюгу її великих досягнень.

У глухі і страшні роки фашистської окупації у маленькому місті Лейдені, в Голландії, на зборах підпільного наукового гуртка юний студент Ван де Хулст зробив чудову доповідь.

Виходячи з теорії будови атома, яка, про що ми вже знаємо, була розвинута наукою на основі періодичного закону Менделєєва, він обчислив, яка повинна бути найдовша хвиля, можлива у спектрі випромінювання водню. За його обчисленням виявилось, що така хвиля повинна мати довжину 21 *см*. Вона повинна лежати в ділянці коротких радіохвиль. Він обчислив, яка повинна бути ймовірність того, що атом водню випромінюватиме такі хвилі. Виявилось, що цілком безнадійно сподіватися виявити це радіовипромінювання на Землі. Потрібно чекати багато мільйонів років, щоб у атомі водню здійснились такі переміщення електронів, які супроводились би випромінюванням радіохвиль довжиною в 21 *см*.

На відміну від добре вивченого видимого спектра, який випромінюється розжареним вод-

нем, його радіовипромінювання повинно відбуватись при низьких температурах. У цій своїй доповіді молодий вчений зробив надзвичайно цікаве припущення. Він сказав, що хоч на Землі і не можна виявити довгохвильове водневе випромінювання, але коли у нескінченності світобудови, у безмежному міжзоряному просторі є водень, можна сподіватись виявити його випромінювання на хвилі 21 *см*. Це було одне з тих блискучих передбачень, які, будучи торжеством людської думки, кладуть початок новій епосі в науці.

Це передбачення справдилось. Виявилось, що з неосяжних глибин Всесвіту до нас на Землю завжди, не припиняючись ні вночі, ні вдень, приходять на хвилі 21 *см* дивовижні радіоповідомлення про таємниці світобудови, які, мов невидимий диктор, розповідає нам міжзоряний водень.

Хвиля довжиною 21 *см* мчить до нашої планети з настільки віддалених кутків світобудови, що потрібні тисячі і мільйони років, поки вона дійде до антен радіотелескопів. Вона розповідає нам, що у Всесвіті існують невидимі для ока хмари водню, величезні своїми розмірами, що простягаються через нескінченні простори Всесвіту від однієї зоряної системи до іншої. Можна навіть визначити протяжність і форму цих скупчень водню. Для хвилі 21 *см* у світовому просторі немає перепон. Навіть чорні, непроникні хмари пилу, що приховують від ока дослідника величезні ділянки Млечної Путі, цілком проникні для холодного випромінювання водню. І ці хвилі допомагають ученим, що досліджують таємниці перетворення речовини, зрозуміти природу речовини, з якої побудовані далекі зірки не тільки нашої зоряної системи — Млечної Путі, але й найбільш віддалених туманностей, що лежать на самому краю видимої частини Всесвіту. І неосяжні зоряні світи, роз'єднані величезними відстанями в порожньому безмежному просторі, тепер виявляються зв'язаними в єдине ціле гігантськими водневими хмарами.

Іноді буває важко прослідкувати послідовність розвитку ідей, але, безперечно, є прямий і неперервний зв'язок між сміливим і чудовим передбаченням юного голландського студента і ідеєю Менделєєва, що створила епоху в науці.

ХІМІЯ ЗІРОК

Хімія Сонця, з якою ми щойно познайомились, — це тільки сторінка із поки що таємничої і загадкової, не прочитаної наукою книги про ядерну хімію зірок.

Сонце — це зірка. Протягом мільярдів років воно висилає в усі кінці Всесвіту величезні потоки енергії, які зогрівають по дорозі і нашу планету. І це тільки коштом запасів водню, що перетворюється на Сонці у гелій.

Дивну і особливу роль відіграє водень у світобудові. Мільйони зірок, схожих на Сонце, дістають свою енергію коштом синтезу гелію з протонів. На багатьох зірках, так само як і на нашому Сонці і в усьому космічному просторі, виявлені величезні запаси водню, що переважає у складі цих зірок над всіма іншими елементами.

Водень, що утворює зірки, займає і міжзоряні простори, де він перебуває у стані холодного нескінченно розрідженого газу.

Яка ж загальна доля водню у Всесвіті?

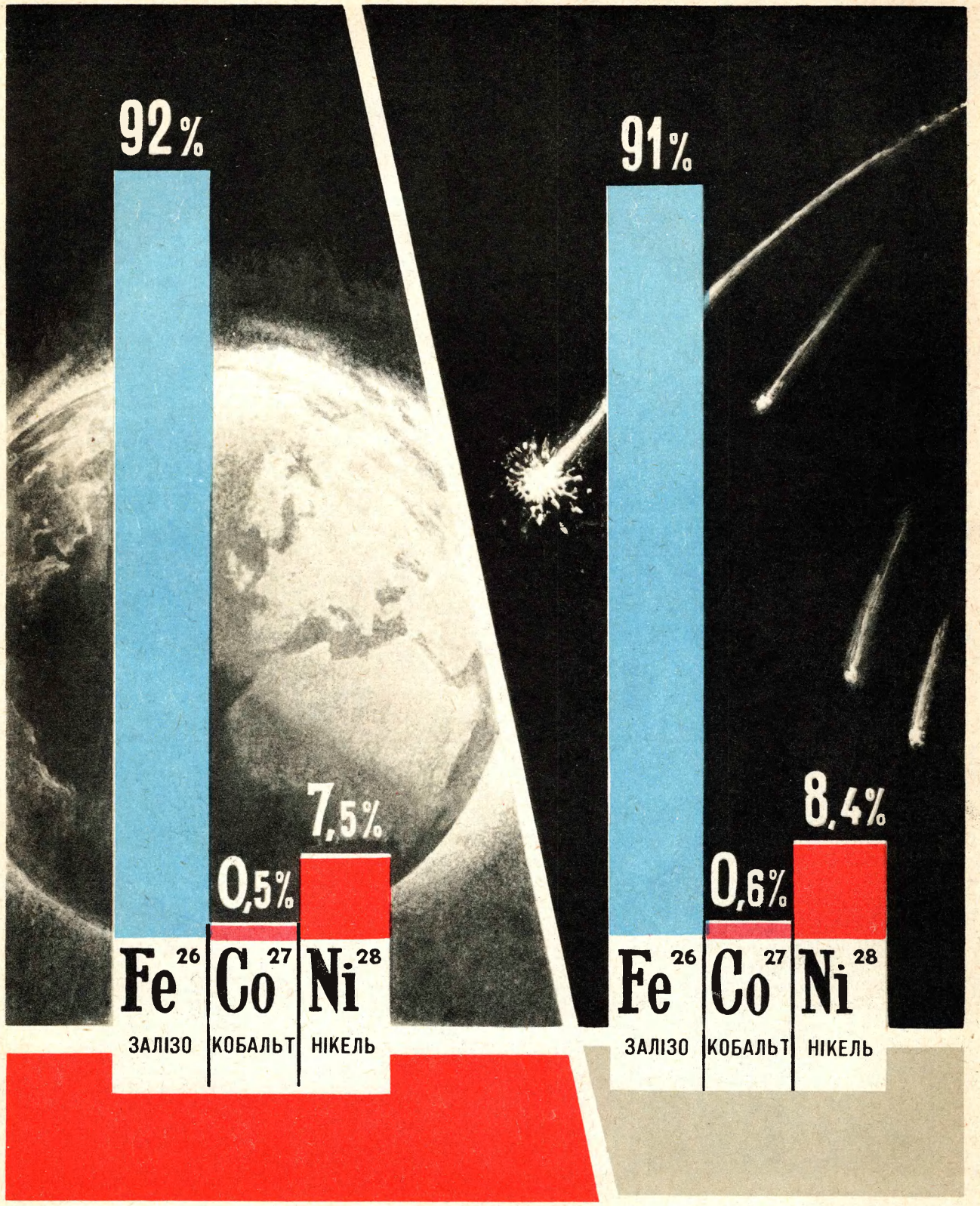
Ми поки що знаємо тільки процес знищення водню при перетворенні його у більш важкі атоми гелію. Але, мабуть, і на Сонці, і на багатьох і багатьох зірках синтез важких елементів на цьому не закінчується. Напевно, і сам гелій вступає в реакцію, утворюючи більш важкі елементи. Недарма ми знаходимо скрізь і на нашій Землі, і в метеоритах, і на Сонці значне переважання парних елементів, атомна вага яких ділиться на чотири, що примушує гадати, що ці найміцніші, найстійкіші у Всесвіті елементи побудовані з ядер гелію з атомною вагою 4.

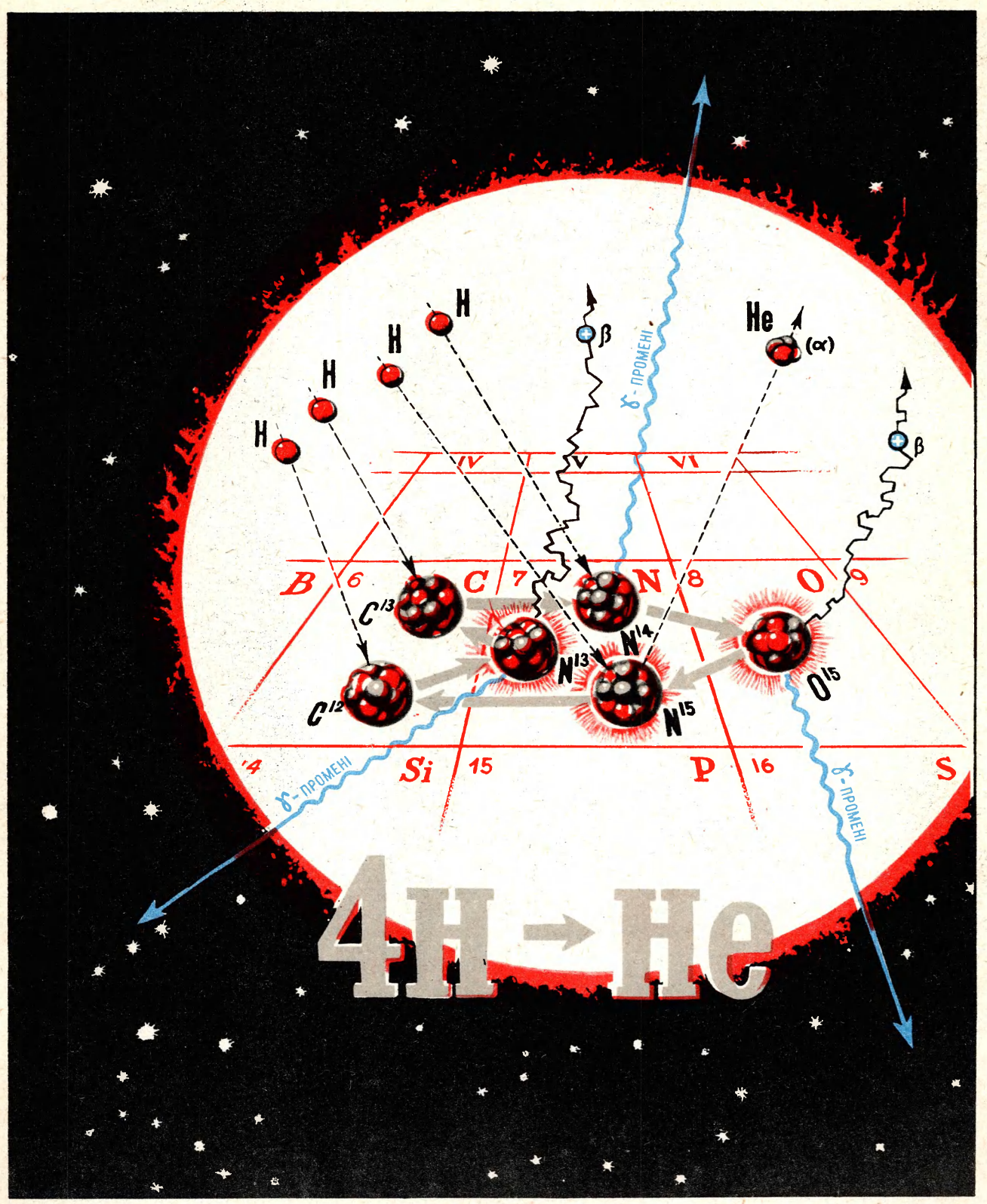
Астрономи визначили розміри сонячної кулі і зуміли визначити її масу — «зважити» її. Фізики дослідили її склад і визначили, скільки на Сонці водню. Ядерна хімія дала змогу виміряти швидкість «згоряння» водню.

На підставі цього обчислили, на скільки часу вистачить водню на Сонці. Виявилось, що протягом дуже великого періоду часу Сонце залишатиметься Сонцем. Більш ніж на двадцять мільярдів років вистачить запасів ядерного горючого на нашому Сонці.

Але все-таки у величезній безлічі зоряних світів відбувається неперервне знищення вод-

Таблиця 39. В єдності речовини у світобудові можна переконатися на прикладі заліза, кобальту і нікелю. На діаграмах показано відносне їх поширення у земній корі і метеоритах. І на Землі, і в метеоритах, що прилітають до нас із Всесвіту, воно однакове.


92%
7,5%
0,5%
Fe 26
ЗАЛІЗО
Co 27
КОБАЛЬТ
Ni 28
НІКЕЛЬ
91%
8,4%
0,6%
Fe 26
ЗАЛІЗО
Co 27
КОБАЛЬТ
Ni 28
НІКЕЛЬ


H
H
H
H
β
γ - ПРОМЕНІ
He
(α)
β
IV
V
VI
B 6
C 7
N 8
O 9
C13
C12
N13
N14
N15
O15
14
Si 15
P 16
S
γ - ПРОМЕНІ
γ - ПРОМЕНІ
4H → He

ню, і загальні запаси його у світобудові зменшуються. Багато вчених на Заході на цій підставі прийшли до важкого і похмурого висновку про «водневу смерть» Всесвіту. Вони вважають, що у безмежних просторах Всесвіту одна за одною гаснуть зірки, які вичерпали свої запаси водню. І ці світила, які раніше яскраво сяяли, одне за одним перетворюються на холодні, мертві світи, яким судилося вічно линути в космічному просторі.

У стародавній китайській енциклопедії, складеній астрономом Ма Туан-ліном, є дуже цікавий і важливий запис про те, як понад дев'ятсот років тому, у 1054 р., китайські вчені спостерігали дивовижну зірку, яка раптово спалахнула на небі у сузір'ї Тельця. Вона сяяла таким світлом, що його можна було порівняти із світлом Місяця. Китайські астрономи описали цю зірку і дуже точно визначили місце її на небосхилі.

У наші часи точно на цьому самому місці небосхилу астрономи знайшли невелику туманність, яка через свою дивну форму дістала назву Крабовидної. А в зовсім останні роки виявлено було, що Крабовидна туманність є дуже потужним джерелом радіовипромінювання, схожого на радіовипромінювання міжзоряного водню.

Уважне дослідження туманності в сузір'ї Тельця показало, що вона розширюється в усі сторони. За швидкістю цього розширення виявилось можливим встановити, що ця туманність виникла понад 900 років тому — точно в той момент, коли стародавні китайські астрономи помітили появу «наднової» зірки на небі.

Вони дуже уважно стежили за нею. Кожного дня вони стежили за її блиском, порівнюючи його з блиском сусідніх зірок. Яскравість цієї зірки поступово меркла; нарешті, зірка зовсім перестала бути помітною. На її місці залишилась ледве помітна туманність.

Питання про появу наднових зірок у світобудові винятково важливе. Але за останні століття, що минули після винайдення телескопа, наднові зірки на небі не спостерігались. Тому в 1954 р. Академія наук СРСР звернулась до Китайської Академії наук з проханням уважно вивчити стародавні літописи Китаю і встановити, чи не спостерігались ще такі ж раптові появи нових над'яскравих зірок на небі. На здивування астрономів виявилось, що поява цих загадкових зірок — не така вже велика рідкість. Ось, наприклад, який запис знайдено було у стародавньому китайському літопису: «У період Чжун Піна, у другий рік, в 10-й місяць, у день Квей Хае (2 жовтня 185 р. н. е.) з'явилася зірка — Гостя посередині Нан Мана (сузір'я Центавра). Вона була завбільшки з бамбукову циновку, і в неї було п'ять кольорів. Поступово вона зменшувала свій блиск до 6-го місяця наступного року (тобто до липня 186 р.), коли вона зникла».

І в цьому місці, де понад 1700 років тому спалахнула наднова зірка, астрономи в наші дні знайшли теж потужне джерело космічного радіовипромінювання — «радіозірку». Зіставляючи на підставі літописних записів стародавніх астрономів число катастрофічних вибухів — появи наднових зірок у найближчому оточенні нашого Сонця з розмірами всієї нашої Галактики, астрономи прийшли до дуже важливого висновку: наднові зірки у нашій Галактиці з'являються в середньому раз на п'ятдесят років. Швидкість їх зникнення така, що яскравість їх знижується вдвоє приблизно за п'ятдесят днів.

Що ж при цьому відбувається у Космосі? Які загадкові процеси в надрах зірки приводять до гігантських катастроф, подібних до тієї катастрофи, яка розкидала зірку у сузір'ї Тельця в 1054 р. і перетворила її у дивовижну за розмірами і фантастичну за обрисами Крабовидну туманність? Справжні розміри цієї туманності у наші дні неймовірно колосальні— вона вже простягається на сотні трильйонів кілометрів.

Що ж за таємничий процес починається у зірках, які дають початок надновим?

Цей процес не може бути тією «мирною» ядернохімічною реакцією, яка відбувається на нашому Сонці,— реакцією утворення гелію з водню.

До утворення наднових зірок може приводити, очевидно, якась поки що зовсім не відома реакція, що приводить до раптового вибуху, до страшенної космічної катастрофи. Яка це реакція, наука поки що не знає.

Але ось, досліджуючи ізотопний склад нових елементів, які не існували на Землі і заново

Таблиця 40. Глибоко в надрах Сонця, де температура досягає двадцяти мільйонів градусів, відбуваються ядернохімічні реакції між воднем (протонами) і вуглецем, азотом і киснем. Цикл цих реакцій із зазначенням зсувів елементів у періодичній системі зображено на таблиці. Цей цикл — замкнений. Результатом його є утворення атома гелію з чотирьох атомів водню. При цьому виділяється енергія Сонця.

створені людиною, вчені виявили серед ізотопів нового зауранового елементу — каліфорнію, що займає 98-е місце в періодичній системі Менделєєва, ізотоп з атомною вагою 254, період піврозпаду якого, як виявилось, дорівнює 55 добам.

У науці виникнув здогад, який зв'язує таємницю наднових зірок з новим елементом каліфорнієм: при таємничій реакції, що починається у надрах зірки і приводить до синтезу важких елементів з переважанням каліфорнію, раптово виділяється величезна кількість енергії, що спричиняє вибух. Зменшення яскравості наднової зірки визначається швидкістю розпаду каліфорнію.

Каліфорній — важкий радіоактивний елемент, він швидко розпадається. Його не могло бути у зірці до катастрофи, що зумовила вибух. Він виникає під час ядерної реакції, яка приводить до синтезу важкого каліфорнію, що лежить за межами періодичної таблиці елементів земної кулі, обмеженої ураном. При цьому, звичайно, повинні виникати і всі інші, більш легкі, ніж каліфорній, елементи, в тому числі і сам уран.

Ми не знаємо, що відбулося з речовиною зірки під час вибуху. Ми не маємо змоги визначити склад речовини Крабовидної туманності. Ми не навчилися ще розуміти радіосигналів, що посилаються таємничими процесами у цій туманності. Але немає сумніву в тому, що вони будуть розгадані, і, можливо, саме цим шляхом наука розкриє одну з найбільших таємниць нашого Всесвіту — «водневу таємницю». Ми тоді пізнаємо і загадку запасів водню в зірках у світовому просторі і розшифруємо процеси, які ведуть до його утворення і до утворення «молодих» водневих зірок. Похмурий висновок про «водневу смерть» Всесвіту, логічно порочний і невірний, спростовується дослідними фактами, досягненнями науки наших днів, першими наріжними каменями в основі однієї з великих наук майбутнього — хімії Всесвіту.

У цієї науки майбутнього багато завдань. Але ці завдання єдині — всі вони зводяться до розгадки таємниць речовини, єдиної в усьому Всесвіті.

Могутньою зброєю пізнання світу, основою для розвитку науки майбутнього ще надовго залишиться великий періодичний закон Менделєєва. Але не слід гадати, що він назавжди може залишитись застиглим і незмінним. Ні, він і сам буде розвиватись, включаючи в себе дедалі більший зміст, усе глибше і точніше відображаючи істину законів природи.

З його допомогою буде остаточно розкрито велику таємницю утворення всіх елементів у Всесвіті. Еволюція — розвиток речовини, утворення одних елементів з інших — нерозривно зв'язана з еволюцією зірок у світобудові.

Ми знаємо про великий синтез гелію з водню на Сонці. Але ми не знаємо, де і як утворюються важкі елементи, наприклад уран або торій. Можливо, це відбувається у нових зірках під час страшенних космічних катастроф. Можливо, це відбувається і в загадкових білих карликах — гарячих, малих за розміром зірках з дивовижною густиною.

Речовина білих карликів у десятки тисяч раз густіша, ніж на Землі. Напевно, електронні оболонки атомів в усіх елементів періодичної системи на цих зірках зруйновані і білі карлики побудовані із вільних атомних ядер і вільних, незв'язаних електронів.

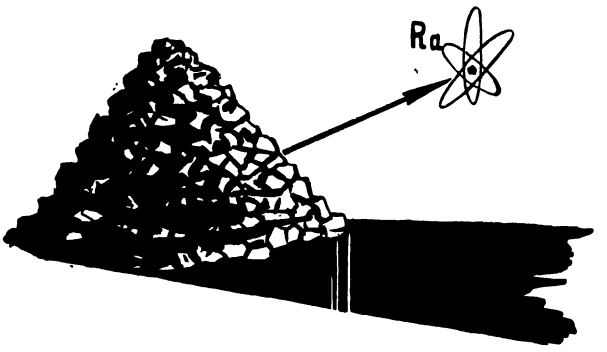
Не ясне питання і про відносну стійкість елементів у світобудові, що визначає як склад земної кулі, так і склад усіх інших небесних тіл Всесвіту. Це питання, можливо, буде розв'язане з допомогою нового періодичного закону будови атомних ядер, що зароджується у наші дні.

Дуже багато роботи чекає вас, молоді спадкоємці великого Менделєєва!

ЯК ПІЗНАЮТЬСЯ ХІМІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ

ХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ — ВАЖЛИВИЙ РОЗДІЛ ХІМІЇ

В історії кожного хімічного елементу, як у біографії кожної людини, існують знаменні дати, що визначають усю його дальшу долю. Особливо знаменною датою є відкриття елементу у природі. Може статися, як це було, наприклад, з галієм, що існування елементу уже передбачено, заздалегідь визначені його найбільш важливі властивості. І все-таки ніхто не може наперед знати, що обіцяє нововідкритий хімічний елемент для людської практики. Коли творці спектрального аналізу Кірхгоф



Із тонни нікому не потрібних відходів... нарешті, добуто одну десяту грама солі радію.

і Бунзен відкрили з його допомогою два нових лужних метали — рубідій і цезій,— нікому і не марились заводи, які є зовсім безлюдними і проте працюють на повну потужність. Керування, пуск і зупинку агрегатів, зміну робочого режиму аж до контролю якості продукції тут замість людини виконують «розумні» прилади-автомати, до числа яких належать і автомати, наділені органами зору. «Очі» таких автоматів — фотоелементи. А незамінними матеріалами для світлочутливого шару, «сітківки» цих електричних очей, виявились саме рубідій і цезій, дуже рідкі лужні метали, які перевищують світлочутливістю всі інші відомі речовини.

Хімічні елементи відкриваються в природі з допомогою х і м і ч н о г о а н а л і з у. Виділення їх у вільному вигляді з природних джерел—завдання того самого хімічного аналізу. Хімічний аналіз супроводжує кожний крок у дослідженні хімічних елементів і всіх новодобуваних сполук.

Хімічний аналіз — це наука, але разом з тим це і мистецтво, строге і точне. І, як усяке справжнє мистецтво, воно вимагає від людини величезної праці, настійливості і терпіння.

Коли Кюрі-Склодовська виявила, що уранова руда має сильнішу радіоактивність, ніж виділений з неї уран, вона запідозрила присутність у руді інших, ще більш радіоактивних елементів.

Це була гіпотеза. Вона могла бути підтверджена лише одним єдиним способом — способом виділення з уранової руди гаданого хімічного елементу засобами хімічного аналізу. На це пішло багато місяців неперервної і неймовірно одноманітної праці: день у день розчинення, осадження, фільтрування, кристалізація і щоразу — випробування добутих кристалів на радіоактивність. Нерадіоактивні продукти відкидались, а з радіоактивними починалось те саме: розчинення, осадження, фільтрування, кристалізація... Від тонни нікому не потрібних залишків уранової руди залишались спочатку кілограми, потім грами, сантиграми... Але, нарешті, настав щасливий день. У руках дослідника була одна десята грама нічим не примітного на вигляд білого порошку хлористої солі радію. Не тільки в хімії, але й у фізиці це торжество хімічного аналізу відкрило новий розділ. Таким був початок шляху, який послідовно, відкриття за відкриттям, привів науку до вивільнення внутрішньоядерної енергії і штучного добування хімічних елементів. І на всьому протязі цього шляху незмінним супутником і помічником дослідників був усе той самий хімічний аналіз.

Без хімічного аналізу не було б хімії. Більше того, без нього не могли б плодотворно розвиватись і всі інші галузі науки і практики, що мають справу з речовинами,— металургія і машинобудування, геологія і гірнича справа. По допомогу до хімічного аналізу звертаються і археолог, розкриваючи секрети своїх знахідок, і мистецтвознавець, встановлюючи справжність старовинних картин. До хімічного аналізу вдається слідчий при вивченні речових доказів злочину (до послуг його спеціальна система хімічного аналізу — судова хімія). Агроном при складанні грунтової карти свого району і плануванні сівби користується даними

Мистецтвознавці встановлюють справжність старовинної картини з допомогою хімічного аналізу.

Вплив добрив на ріст і розвиток рослин: на ділянці А внесено добрива; ділянка Б без добрив.

хімічного аналізу грунту і агрохімії — науки, що народилась з хімічних аналізів грунтів і рослин.

ЯК ВИНИКЛА АГРОХІМІЯ

Ледве встигши закінчити в Парижі гірничий інститут, молодий учений Буссенго вирушив в Південну Америку битися під прапорами Болівара (ім'я його носить тепер одна з латиноамериканських країн, Болівія) у визвольній війні проти іспанського панування. Беручи участь у походах, Буссенго знаходив час вивчати природні багатства країни. Він розгортав свою похідну аналітичну лабораторію скрізь, куди кидала його війна. Особливу увагу дослідника привернуло одне цікаве явище: багаті врожаї, що їх збирають в Америці на зовсім неродючих пісках після внесення в них пташиного посліду — гуано. Буссенго зробив хімічний аналіз гуано і виявив у ньому високий вміст зв'язаного азоту. Ці аналізи Буссенго і були не чим іншим, як народженням агрохімії.

Кому ж тепер не відомо, що найбільш неродючі грунти стають родючими після внесення в них азотних, фосфорних і калійних добрив?

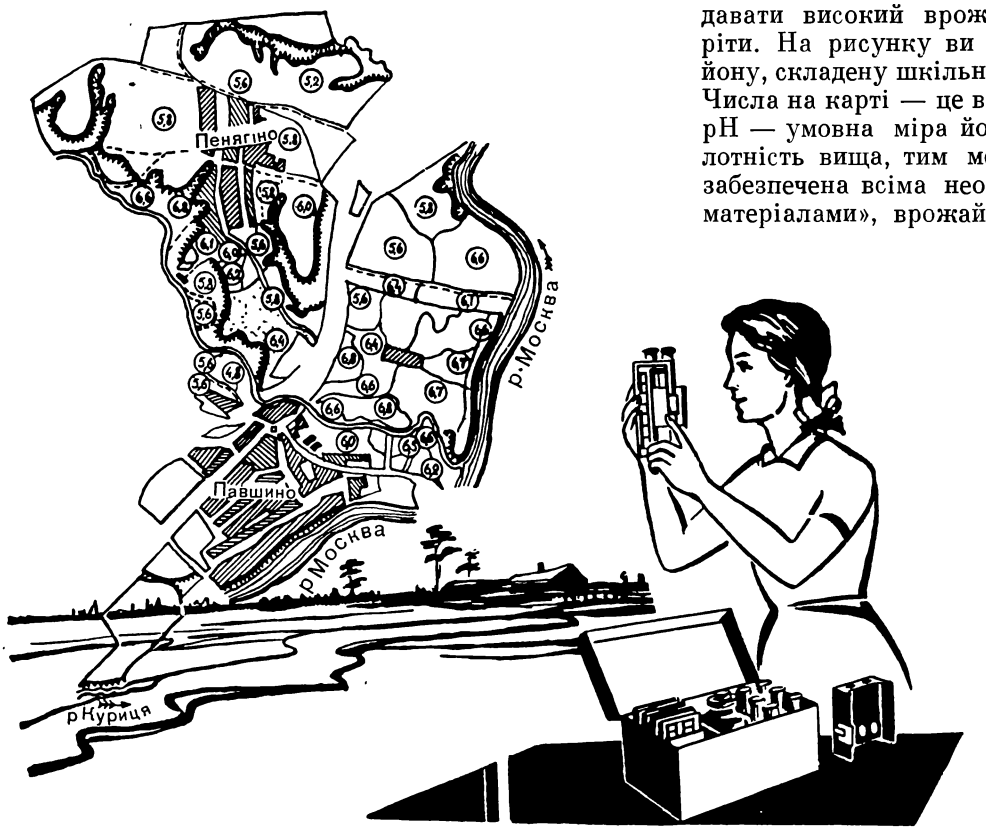
Але рослини потребують не тільки азоту, фосфору і калію. Хімічним аналізом спочатку в організмі тварин, а потім у рослинах виявлено було мідь. Це відкриття вимагало більшої вмілості, ніж відкриття в організмах азоту, тому що в одному кілограмі рослинної маси міститься міді не більше, ніж у мідній шпильковій головці. Це спонукало вивчати роль міді у складному «хімічному господарстві» живих організмів. Виявилось, що мідь попадає в рослини із грунту не випадково. Хоч її вміст у рослинах і тваринах незначний, мідь не менш потрібна для нормального росту і розвитку рослин і тварин, ніж азот чи фосфор.

У грунті міститься дуже мало міді. Якщо ж грунт особливо бідний на мідь, рослини захворюють і сохнуть. Такими особливо бідними на мідь грунтами, як виявив хімічний аналіз, є торфові і заболочені грунти. З них можна знімати врожай, лише підживлюючи рослини мідними добривами. Так хімічний аналіз допомагає радгоспам і колгоспам освоювати мільйони гектарів нових земель, здавалося, назавжди втрачених для хліборобства.

Хімічні елементи, потрібні або корисні для рослин і тварин у малих кількостях, називаються мікроелементами. До мікроелементів, крім міді, належать бор, марганець, цинк, кобальт, молібден. Якщо хімічним аналізом встановлюється, що в грунті не вистачає того чи іншого мікроелементу, його вносять у нього у вигляді мікродобрива. Мікроелементи впливають і на якість урожаю. Так, марганець і бор підвищують цукристість цукрових буряків; той самий бор і інші мікроелементи впливають на вміст жиру у плодах сої, насінні соняшника і льону.

Недостатній вміст мікроелементів у грунті відбивається і на тваринах, спричиняючи різні захворювання. Але рослини і тварини можуть захворювати не тільки від недостачі, але й від

Ріст рослин: зліва — на грунтах, бідних на мідь; справа — на грунтах з нормальним вмістом міді.



Агрохімічна карта району допомагає правильно розміщувати сільськогосподарські культури.

надміру мікроелементів. На грунтах з підвищеним вмістом дуже рідкого елементу селену рослини розвиваються нормально, але селен, попадаючи в рослинні білки, частково заміщує у них сірку. Для худоби такі рослини стають отруйними. Райони, в яких поширене масове захворювання рослин, тварин або людей через недостачу або надмір у грунтах того чи іншого мікроелементу, називаються біогеохімічними провінціями. Таких провінцій дуже багато в Латвійській РСР. Це спричиняло великі втрати тваринництву республіки, поки латвійські вчені засобами хімічного аналізу не виявили причини захворювань тварин. Виявлено було, що в грунті не вистачає кобальту. Практикам сільського господарства залишилось тільки поповнити цю недостачу.

Грунт впливає на врожай не тільки через «будівельні матеріали», що доставляються рослині. На одному і тому ж грунті залежно від ступеня його кислотності один вид рослин може давати високий врожай, а інші будуть хиріти. На рисунку ви бачите карту грунтів району, складену шкільним агрохімічним гуртком. Числа на карті — це водневий показник грунту pH — умовна міра його кислотності: чим кислотність вища, тим менше pH. Якщо рослина забезпечена всіма необхідними «будівельними матеріалами», врожайність залежить від pH. Так, на кислих грунтах (з pH від 5 до 5,5) ростки ячменю не розвиваються, а картопля саме в цих умовах дає найбільший урожай.

Визначення водневого показника в агрохімічному аналізі провадиться з допомогою і н д и к а т о р і в. Індикаторами є більшість пігментів, що надають пелюсткам квітів їх різноманітного забарвлення (крім жовтих). Так, зміна забарвлення квіток медуниці, що скрізь зацвітає ранньою весною, з червоного на фіолетове, а далі на голубе спричиняється зміною забарвлення пігменту-індикатора в зв'язку із зміною кислотності клітинного соку з віком квітки. Індикаторами є і багато барвників, якими фарбують матерію, папір, підлоги. Цим і пояснюється поява на одягу і обгортках зошитів кольорових плям при попаданні крапель кислоти. Плями ці зникають при нейтралізації нашатирним спиртом.

Зміна забарвлення кожного індикатора відбувається в певному інтервалі значень pH. Так, загальновідомий лакмус має синє забарвлення у лужних середовищах і червоне — в кислих. Перехід червоного забарвлення лакмусу в синє через фіолетове починається при pH, що дорівнює 6, і кінчається при pH, що дорівнює 8. Порівнюючи на око відтінок забарвлення лакмусу у випробовуваному розчині із забарвленням лакмусу в заздалегідь виготовлених розчинах з відомими значеннями pH, можна визначити pH грунтового розчину. Для визначення pH кисліших розчинів вдаються до інших індикаторів, наприклад метилоранжу,

перехід якого з рожевого забарвлення в жовте відбувається у другому інтервалі значень pH— між 3 і 5 (див. кольорову таблицю на стор. 616).

ХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ НА ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВАХ

Найбільш пряме і безпосереднє відношення хімічний аналіз має до розшуків корисних копалин і до обробки їх на хімічних і металургійних заводах.

Предметом першої необхідності всіх геологів при розшуках корисних копалин є похідна хімічна лабораторія, з допомогою якої вони можуть зробити на місці найпростіший хімічний аналіз знайденого мінералу. Обов'язковим відділом будь-якого хімічного, металургійного, силікатного або нафтопереробного заводу є хімічна лабораторія. Лабораторія пильно стежить за тим, щоб на завод надходила доброякісна сировина, щоб точно, «за розкладом» і нормами відбувалась її переробка, щоб продукти цієї переробки відповідали державним стандартам.

Робітники лабораторії прагнуть до того, щоб було по змозі менше невикористовуваних відходів виробництва. Хімічна лабораторія — це суворий суддя і порадник будь-якого технологічного процесу.

На одному з уральських заводів протягом багатьох років з цинкової руди виплавляли цинк. Руду, що надходила на завод, аналізували тільки на вміст цинку.

Біля заводу у величезних кількостях скупчились відходи. Хімічна лабораторія заводу вирішила дізнатись, які ж елементи містяться в них. Виявилось, що поряд із поширеними елементами у відходи потрапляє рідкісний і дорогий метал галій, кілограм якого коштує кілька десятків тисяч карбованців. Завод перебудували і почали виділяти з руди не тільки цинк, але й галій.

Фізики виявили, що один з рідкісних металів — германій — є напівпровідником. Напівпровідники знайшли тепер широке застосування: невелика пластинка германію об'ємом кілька кубічних міліметрів може заміняти у радіоприймачі і в телевізорі радіолампу.

Але германію в природі надзвичайно мало, і він не утворює рудних родовищ. Хіміки-аналітики дістали завдання відшукати природні матеріали, з яких можна було б виділити германій. Було проаналізовано багато природних мінералів і відходів різних виробництв. Виявилось, що германій міститься у золі донбаського вугілля і в пилу, що осідає в очисних системах на коксогазових заводах.

Хімічні лабораторії є тепер при всіх заводах, у багатьох інститутах і підприємствах. Одне з основних завдань цих лабораторій—проведення аналізів. Раніше ніж використати будь-яку сировину, її піддають хімічному аналізу і дають оцінку різним властивостям матеріалу. Аналізу піддають і готові продукти хімічної промисловості.

АНАЛІЗ «НА ПОЛУМ'Я»

У багатьох містах Радянського Союзу в дні урочистих свят влаштовують салют. Гримлять постріли, і в небо з шипінням злітають ракети, що розсипаються різнобарвними іскрами — червоними, жовтими, зеленими. Людина, обізнана з хімією, легко відповість на питання про причини яскравого забарвлення святкових вогнів. Вона скаже, що червоне забарвлення утворилось внаслідок додавання до пороху солей стронцію, жовте—солей натрію, зелене — солей барію і т. д. (див. кольорову таблицю на стор. 617).

Визначення хімічних елементів за забарвленням полум'я є найпростішим методом хімічного аналізу. Щоб скласти уявлення про цей метод, ви можете користуватись простою залізною дротинкою. Дротинку змочують розчином досліджуваної солі і вносять у край полум'я пальника, трохи нижче його середини. Полум'я одразу ж забарвлюється у відповідний колір.

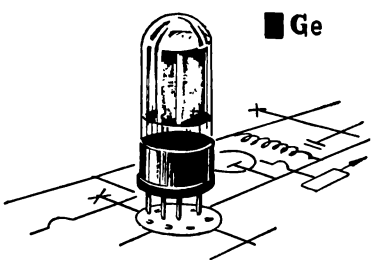
СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Внесіть в язичок полум'я газового пальника або в полум'я спиртового пальника кінчик цигарки, і полум'я зразу ж забарвиться у ясно-бузковий колір: це виявив себе калій, добутий колись із грунту корінцями тютюну. Якщо в аналізованій речовині є і калій і натрій, то натрій ви відкриєте описаним способом, а калій — ні. Жовте забарвлення, що його надають полум'ю солі натрію, таке інтенсивне, що воно замаскує забарвлення полум'я калієм. А втім, калій все-таки можна виявити реакцією «на полум'я», якщо у вас знайдеться густо-синє скло (його може замінити пробірка з розчином фіолетового чорнила). Це скло не пропустить жовтого проміння натрію, але дозволить виявити по бузковому забарвленню полум'я наявність калію.

Геологи найпростішими хімічними способами визначають склад мінералів.

Але існує прилад, який цілком усуває подібні перепони. Це спектроскоп. Він дозволяє виявляти хімічні елементи по забарвленню полум'я, скільки б цих елементів не містилось в аналізованій суміші. Подивившись у спектроскоп, ми побачимо замість хиткого язичка полум'я темне поле, пересічене яскравими тонкими лініями (див. кольорову таблицю на стор. 617). З них особливо виділяється в середині спектра подвійна жовта лінія, що належить натрію. Ближче до фіолетового кінця спектра мерехтить ціла група слабкіших ліній — голубих і фіолетових, вони належать калію. Світло, що його посилає в наше око полум'я спиртової лампочки, спектроскоп розклав на окремі промені. Тепер не становить особливих труднощів розшифрувати спектр, тобто розібратись у тому, якому хімічному елементові належить кожна лінія. Для цього кольорові лінії порівнюють з «атласом спектральних ліній» — своєрідним описом усіх досліджених спектрів елементів.

Отже, в спектрі полум'я проти певної поділки спектроскопічної шкали з'являються спектральні лінії елементів, що містяться в суміші. За забарвленням, що надається полум'ю, іноді можна сплутати елементи, скажімо, стронцій з кальцієм (обидва забарвлюють полум'я в червоний колір). Але спектри їх містять різне число ліній, які розміщені по-різному.



Пластинка германію в кілька кубічних міліметрів замінює в радіоприймачі і телевізорі радіолампу.

Тепер ви легко зможете уявити собі переживання хіміка Лекока де Буабодрана, коли серед інших добре відомих йому ліній він у 1875 р. побачив у спектрі цинкової обманки ледве помітну лінію, яка завідомо не належала ні одному з числа відомих у той час хімічних елементів. Цю лінію спектра давав якийсь новий елемент. Буабодран виділив його і назвав галієм.

Галій — не єдиний хімічний елемент, відкритий з допомогою спектрального аналізу. Задовго до нього, майже в один і той же час і таким же способом відкрито було рубідій і цезій, індій і калій. Свої назви ці чотири елементи дістали за забарвленням ліній в їх спектрах, що найбільше впадають в око: голубої у цезію (від «цезіус» — небесно-голубий), двох червоних у рубідію (від «рубідус» — яскраво-чер-

У хімічній лабораторії.

воний), зеленої у талію (від «талос» — зелена гілка) і синьої у індію (від «індиго» — синя фарба).

Але справжнім тріумфом спектрального аналізу було відкриття у спектрі сонячного протуберанця нового хімічного елементу — гелію (про це докладно розповідано на стор. 584). А через двадцять сім років після того той самий гелій було повторно відкрито на Землі.

Незадовго до відкриття гелію на Сонці французький філософ-ідеаліст Огюст Конт, намагаючись довести безсилля людського розуму, оголосив, що людина ніколи не пізнає, наприклад, хімічного складу небесних світил. Спектральний аналіз зробив «неможливе» можливим. Більше того, визначати з його допомогою склад далеких небесних світил виявилося не важче, ніж аналізувати те, що ми можемо взяти в руки.

Спектральний аналіз відзначається величезною чутливістю. Жовта лінія натрію, наприклад, на мить спалахує у спектрі полум'я, коли в нього вводиться усього десятимільйонна частка міліграма натрію. Ми ще тільки мріємо про аналітичні терези, на яких можна було б зважити таку малу кількість речовини. Спектральний аналіз характеризується також швидкістю. Існують спектральні прилади — вони називаються квантометрами, — які автоматично видають усього через 2—3 хв. готовий кількісний аналіз вміщеного у них зразка, що містить десятки хімічних елементів. При спектральному аналізі витрачається зовсім не значна кількість аналізованої речовини, що дозволяє досліджувати навіть готові металеві деталі, не завдаючи їм жодної шкоди.

З допомогою спектрального аналізу розв'язуються найрізноманітніші виробничі завдання: від сортування сплавів у заготівельних цехах до перевірки сорту металу в уже готових виробах. З допомогою спектрального аналізу реєструються найменші частки домішок (до 0,000001%) в особливо чистих матеріалах для техніки напівпровідників.

Особливо ж широко почав застосовуватись спектральний аналіз в сталеливарній промисловості. Перенесемося у мартенівський цех. У величезних прогонах вишикувались вряд вогнедишні печі. Тут дуже просторо, і здається, що робота йде повільно. По обидва боки від печей прокладено рейки. З одного боку по них повільно простують завалювальні машини з довгими рухомими «руками». Ось відкрилась палаюча паща печі, від машини протяглася «рука», підхопила стальний ящик-мульду, що стоїть біля печі, спритно сунула його в піч і перекинула там, висипавши вміст. По другий бік на численних шляхах стоять готові прийняти метал форми-виливниці. Високо під стелею крани плавно несуть багатотонні ковші.

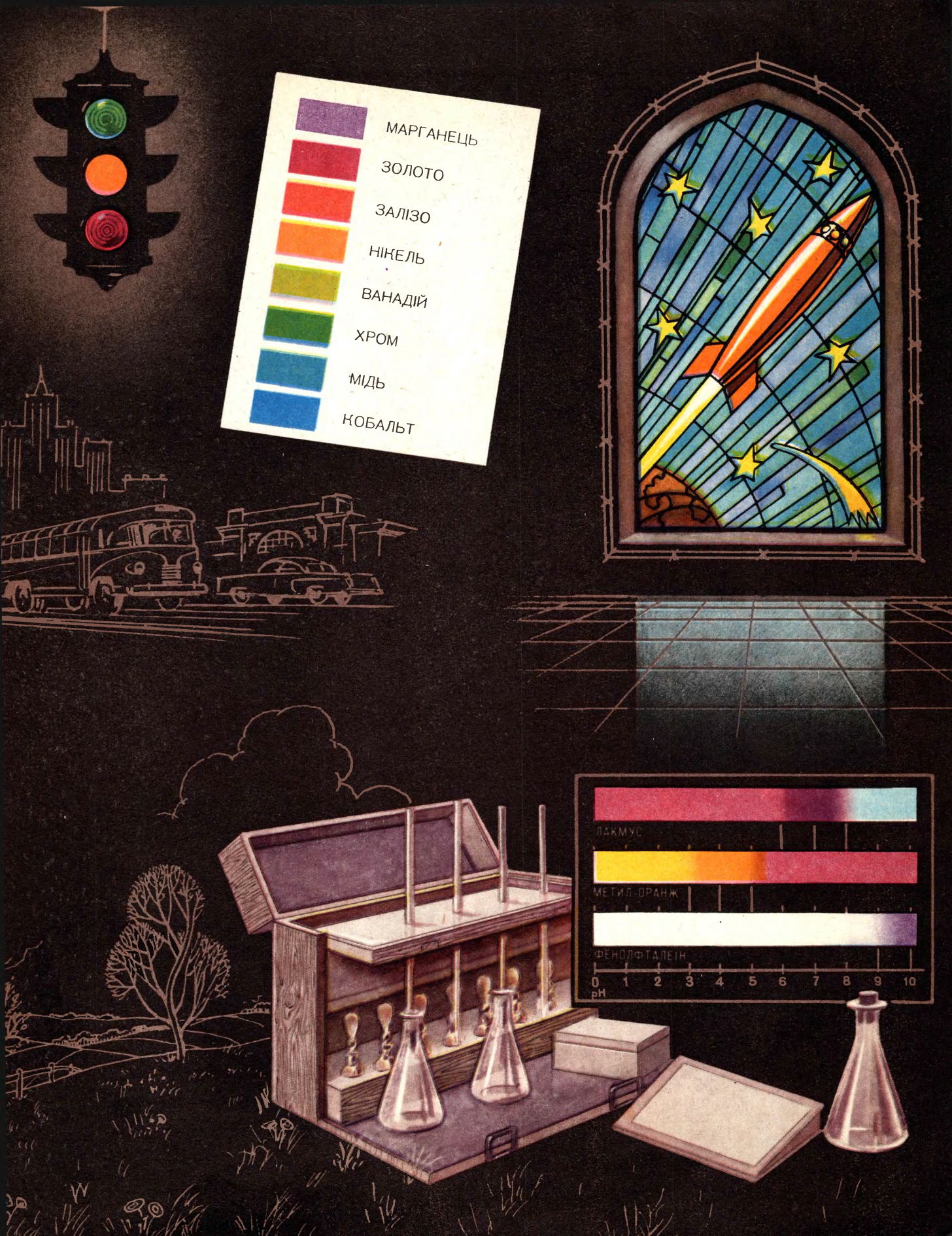
У печах, де вариться сталь, гуде полум'я, на поверхні металу кипить і плескотить шлак. Необізнаній людині здається, що нічого не можна розібрати в цьому пеклі. Але суворо і уважно стежать за роботою печі сталевари. Через кожні 15—20 хв. з печі беруть стальною ложкою на довгій ручці пробу, і експрес-лабораторія проводить спектральний аналіз вмісту. Залежно від того, що показав аналіз, майстер змінює температурний режим печі — зменшує або збільшує подачу палива — або наказує добавити в піч вапно, марганець та інші компоненти, потрібні в даний момент для правильного ходу процесу.

На багатьох заводах нашої країни до 70—80% всіх аналізів металу проводиться методами спектрального аналізу.

АНАЛІЗ «НА ПЕРЛ»

Наявність деяких хімічних елементів можна визначити не тільки по забарвленню полум'я, але й по забарвленню, якого вони надають прозорому склу (див. кольорову таблицю на цій стор.). Зеленуватий колір звичайного віконного скла пояснюється наявністю в його складі двовалентного заліза. Забарвлення кольорових стекол настільки характерне, що по ньому можна легко визначити, які речовини застосовували при виготовленні цих стекол сотні років тому. Так, розглядаючи мозаїку «Полтавська битва», створену М. В. Ломоносовим, можна твердити, що для забарвлення стекол він вживав сполуки кобальту, міді,

Таблиця 41. В середині верхньої частини рисунка зображено забарвлення стекол, в яких містяться невеликі кількості солей марганцю, золота, заліза та інших металів. Деякі види цих кольорових стекол ми завжди бачимо у світлофорах (рисунок зліва) і вітражах (рисунок справа). У нижній частині рисунка зображено зміну кольору різних індикаторів (лакмусу, метилоранжу і фенолфталеїну) залежно від кислотності і лужності розчину. Ці індикатори є обов'язковими в будь-якій похідній лабораторії і ящику-лабораторії.


МАРГАНЕЦЬ
ЗОЛОТО
ЗАЛІЗО
НІКЕЛЬ
ВАНАДІЙ
ХРОМ
МІДЬ
КОБАЛЬТ
ЛАКМУС
МЕТИЛ-ОРАНЖ
ФЕНОЛФТАЛЕЇН
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
pH

$CaCl_2$
$Ba(NO_3)_2$
$Sr(NO_3)_2$
$(CuOH)_2CO_3$
KCl
NaCl
МАЛАХІТ
Cl^-
K^+
Cl^-
Na^+

заліза, нікелю, хрому та інших елементів. Ось якого забарвлення надають склу різні елементи:

Елемент	Забарвлення	Елемент	Забарвлення
Хром	зелене	Ванадій	жовто-зелене
Кобальт	синє	Залізо (тривалентне)	жовте
Мідь	синьо-зелене		
Марганець	фіолетове	Залізо (двовалентне)	ясно-зелене
Нікель	червоно-коричневе		

Забарвлювання стекол сполуками різних хімічних елементів можна застосувати і для виявлення самих елементів. Для цього вживають не звичайні силікатні стекла, а буру, яка дає при застиганні легкоплавке (борне) скло, або сіль $NaNH_4HPO_4$, яка утворює «фосфорне» скло.

Платинову дротинку, кінець якої зігнутий у вигляді невеликої петлі, нагрівають у полум'ї пальника і швидко доторкуються нею до порошкоподібної бури (або борної кислоти, або солі $NaNH_4HPO_4$). Кусочки бури приплавляються до дротинки. Її знову нагрівають і знову доторкуються до бури, щоб розплавлена бура заповнила петлю дротинки. Потім кінець дротинки опускають у розчин аналізованої речовини і знову розплавляють у полум'ї пальника. При цьому і утворюється бусинка забарвленого борного скла, яку називають перлом. По забарвленню перла і можна судити про наявність того чи іншого елементу.

Фосфорне перло забарвлюється сполуками міді у непрозорий червоний колір, а залізо цю сіль майже не забарвлює. Забарвлення фосфорного перла іншими елементами подібне до забарвлення з бурою.

Якщо немає платинової дротинки, можна скористуватись ніхромовою дротинкою, відламавши кусочок її від спіралі електроплитки і намотавши вільний кінець на дерев'яну па-

Кольорова мозаїка «Полтавська битва», створена М. В. Ломоносовим із забарвлених стекол.

Таблиця 42. Вгорі зображено різнобарвні вогні салюту, що утворюються із розжарених парів різних металів. У лабораторії такі пари можна дістати шляхом внесення на кінчику платинової дротинки у полум'я пальника летких солей цих металів, наприклад хлористого кальцію ($CaCl_2$), азотнокислого барію ($Ba(NO_3)_2$) і т. д. (зображено вгорі зліва і посередині). Внизу зліва зображено малахіт ($Cu_2(OH)_2CO_3$), який, маючи зелений колір, забарвлює полум'я пальника в голубий колір. У центрі таблиці зображено спектральні лінії, які можна спостерігати в полі спектроскопа при розгляді полум'я крізь трубку спектроскопа. Внизу справа зображено решітки кристалів кухонної солі (NaCl) і хлористого калію (KCl), а поряд з ними форму кристалів, що утворюються при дії на розчини кухонної солі кремнефтористоводневою кислотою, а на розчини хлористого калію — винною кислотою.

личку. Але нікель і хром, що входять до складу ніхрому, самі трохи забарвлюють перл бури.

Описані вище методи виявлення елементів належать до фізико-хімічних методів аналізу, тому що в них використовувались фізичні властивості виявлюваних елементів — забарвлення полум'я і забарвлення стекол. Існують і інші фізико-хімічні методи хімічного аналізу, які знайшли застосування у практиці хімічних лабораторій.

Але більшість фізико-хімічних способів потребує спеціальної і іноді досить складної апаратури. Найдоступнішими і широко розповсюдженими способами визначення складу речовин є чисто хімічні методи аналізу. Для цих методів потрібне найпростіше обладнання: пробірки, склянки і лійки.

ХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ «МОКРИМ СПОСОБОМ»

Цей аналіз побудований на тому, що кожний хімічний елемент здатний вступати з певним реактивом у хімічне взаємодіяння, яке супроводиться характерними зовнішніми ознаками: появою певного забарвлення, виділенням газу з характерним запахом чи забарвленням, утворенням осаду і т. д.

Якось в одному з південних міст спалахнула епідемія дизентерії. Походження її не вдалося з'ясувати, поки не втрутився хімічний аналіз. Місто постачалось водою із джерел, в яких не було солей соляної кислоти, тобто іонів хлору. Тим часом водопровідна вода несподівано почала давати «реакцію на хлор»: при підкисленні її азотною кислотою і додаванні розчину азотнокислого срібла з'являлась каламуть.

Якщо риба не йде ні на одну принаду, то піймати її можна, тільки вичерпавши усю воду в ставу. Подібним до цього способом було відкрито аргон.

Відомо, що хлор у вигляді хлористого натрію завжди міститься в каналізаційних водах. Тому виникло припущення, що в підземних переплетеннях водопровідної і каналізаційної сітки труб десь відбулось змикання тих і інших і у водопровідну воду почала попадати стічна вода, насичена хвороботворними мікробами. При перевірці припущення справдилось, і залишилось тільки усунути джерело зла.

Іони брому і йоду з азотнокислим сріблом теж дають осад, не розчинний у кислотах. Тому азотнокисле срібло в аналітичній хімії належить до числа групових реактивів.

Групові реактиви в якісному аналізі вживаються для виявлення усіх іонів даної групи. Крім того, з їх допомогою іони цієї групи відокремлюються від іонів усіх інших груп. Але якщо заздалегідь відомо, що в аналізованій речовині може міститись тільки один вид іонів з числа всіх іонів, які входять до даної групи, справа спрощується. Так, якщо мінеральне добриво являє собою білу речовину, розчинну у воді, якщо розчин його при діянні розчину азотнокислого срібла дає білий сирнистий осад, якщо, нарешті, цей осад не зникає при діянні азотної кислоти, то ми маємо справу з хлористим калієм. Щоб остаточно переконатись у цьому, залишається використати реакцію калію «на полум'я».

Якщо ж водний настій добрива при діянні розчину азотнокислого срібла дає осад кольору яєчного жовтка і цей осад при діянні азотної кислоти зразу розчиняється, ми маємо справу із суперфосфатом. З усіх нерозчинних солей срібла таке забарвлення має лише фосфат срібла, який утворюється в цьому випадку. Інші ж фосфорні добрива — фосфоритне і кісткове борошно і преципітат (крім амофосу) — самі не розчинні у воді.

Поряд з груповими реактивами в аналітичній хімії використовують також індивідуальні реактиви.

Такі реактиви знайдено для будь-яких солей і кислот.

Як приклад наведемо деякі реакції і реактиви на найбільш поширені елементи: залізо, свинець, мідь, алюміній, кальцій і маг-

ній, а також на сірчану, соляну і азотну кислоти або їх солі.

На солі тривалентного заліза є два найбільш характерних реактиви: залізистоціанистий калій («жовта кров'яна сіль») і роданистий амоній.

З першим реактивом розчини солей тривалентного заліза дають нерозчинний у воді осад темно-синього кольору, що називається берлінською блакиттю. Ця речовина відома кожному художникові, бо вона служить матеріалом для виготовлення темно-синіх фарб і звичайно входить до набору фарб. Цю фарбу часто так і називають берлінською блакиттю.

Добрим реактивом на солі заліза є і роданистий амоній. З розчином солей тривалентного заліза він утворює розчинну речовину характерного криваво-червоного кольору. Служителі релігійних культів в минулі часи використовували реакцію тривалентного заліза з роданистим амонієм для «появи крові» на тілі людини без будь-яких порізів на ньому.

Діяння групового реактиву схоже з діянням принади: одні риби на неї йдуть, а інші ні.

Візьміть, наприклад, 10—15-процентний розчин роданистого амонію і, змочивши ним вату, протріть руку. Далі проведіть по руці тупим ножем, змоченим розчином хлорного (тривалентного) заліза. На руці зразу ж з'явиться темно-червона смужка «крові».

Розчини солей свинцю виявляються розчином йодистого калію. При цьому випадає жовтий осад йодистого свинцю.

Якщо цей осад розчинити при нагріванні, а потім розчин знову охолодити, то з нього випаде йодистий свинець у вигляді красивих золотисто-жовтих блискучих кристаликів, що грають на сонці всіма барвами райдуги.

Солі міді виявляють з допомогою розчину аміаку. Якщо, наприклад, до розчину мідного купоросу долити у надмірі водний розчин аміаку (відомий в ужитку під назвою нашатирного спирту), то утворюється складна сполука — аміакат міді, яка має красиве інтенсивне блакитно-синє забарвлення.

Цим методом мідь можна виявити в присутності найрізноманітніших солей. Змішайте в пробірці розчини солей заліза, алюмінію, кальцію і міді. Прилийте до цього розчину надлишок водного розчину аміаку. Потім розчин відфільтруйте від осаду, що випав. Крізь фільтр пройде розчин, забарвлений у блакитно-синій колір, що вказує на наявність міді.

Алюміній належить до амфотерних металів, і тому його гідроокис добре розчиняється в лугах. Якщо до розчину солі алюмінію долити невелику кількість лугу, наприклад їдкого натру, то випаде білий осад гідроокису алюмінію. У надлишку лугу цей осад розчиняється в результаті утворення солі, що називається алюмінатом. (У цьому випадку утвориться алюмінат натрію).

Подібно до цього поводять себе і солі свинцю, але їх можна легко відкрити іншими реакціями.

Розчинення гідроокису алюмінію в лугах можна використати і для відокремлення цього елементу від інших елементів. Для цього до розчину солей алюмінію потрібно долити надлишок лугу і осад різних гідроокисів відфільтрувати. Крізь фільтр пройде розчин алюмінату натрію.

Для виявлення алюмінію в цьому фільтраті потрібно добавити до нього твердого хлористого амонію і розчин прокип'ятити. Якщо випаде білий напівпрозорий осад, це вказуватиме на наявність алюмінію.

Солі кальцію легко виявляються розбавленою сірчаною кислотою. При цьому випадає білий осад сірчанокислого кальцію, або гіпсу. Подібний до цього білий осад утворюють і солі барію, які дають сірчанокислий барій. Але осад барію відрізняється від осаду гіпсу тим, що гіпс має дуже характерну, яку легко запам'ятати, кристалічну структуру, що її можна

виявити під мікроскопом або крізь лупу (див. кольорову таблицю). Характерні кристали солі кальцію утворюються також з виннокислим натрієм (див. ту саму кольорову таблицю).

Солі магнію виявляють солями фосфорної кислоти в присутності солей амонію. Для цього до розчину солей магнію приливають деяку кількість розчину хлористого амонію і аміаку до слабкого запаху, а потім при збовтуванні — розчин двозаміщеного фосфату натрію. Випадає білий дрібнокристалічний осад подвійної солі магнію і амонію — $MgNH_4PO_4$, який має ще ту властивість, що дуже легко «повзе» вгору по стінках пробірки.

Солі амонію, а також сірчану, соляну і азотну кислоти та їх солі можна легко виявити досить простими реакціями.

Для виявлення солей амонію до сухої солі, вміщеної в пробірку (або до розчину солі), приливають розчин лугу і нагрівають. При цьому чути запах аміаку, що утворюється за реакцією:

$$NH_4Cl + NaOH = NaCl + H_2O + NH_3.$$

Так розпізнаються, зокрема, амонійні добрива.

Сірчана кислота і її солі дають з солями барію білий осад сірчанокислого барію, який не розчиняється при дальшому добавлянні азотної кислоти.

Соляна кислота і її солі, як вказано було вище, дають з азотнокислим сріблом білий осад хлористого срібла.

Азотну кислоту і її солі виявляють з допомогою солей двовалентного заліза і сірчаної кислоти. Для цього до водного розчину солі приливають у пробірку кілька крапель сірчанокислого заліза. Потім пробірку трохи нахиляють і обережно приливають по її стінці 1—2 *см*³ концентрованої сірчаної кислоти. Сірчана кислота, як більш важка рідина, збирається на дні пробірки. При наявності солей азотної кислоти на границі між розчином сірчаної кислоти і розчином азотнокислих солей з'являється буре забарвлення. У цьому місці утворюються забарвлені складні сполуки заліза, в молекули яких входять окисли азоту.

МЕТАЛИ

СКІЛЬКИ МЕТАЛІВ ОБСЛУГОВУЮТЬ НАС

Огляніться навколо себе або подивіться на рисунок (стор. 621), і ви будете вражені, як багато металів обслуговують наше повсякденне життя.

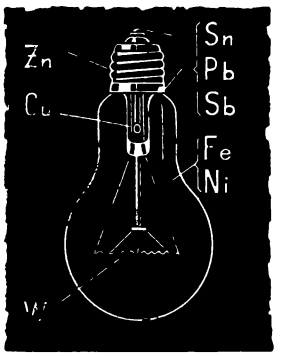
Що ми бачимо на столі? Чайник з алюмінію, склянку у підстаканнику із срібла або мельхіору — сплаву міді з нікелем, відкриту консервну банку із жерсті — лудженого заліза, тобто заліза, покритого тонким шаром олова, і, нарешті, столовий набір, можливо, із нержавіючої сталі і латуні. Нержавіюча сталь — сплав заліза і хрому, а латунь — сплав міді з цинком.

Подивіться на свій столовий ніж: чи не відбито на його блискучому, ледь голубуватому лезі клеймо «нерж. ст.», а на ледве золотистій рукоятці — «латунь»? На таких ножах, виделках і ложках ніколи не з'являються плями іржі.

Ось уже в обладнанні одного тільки стола ми нарахували вісім металів. Порахуємо тепер, скільки металічних матеріалів бере участь в освітленні нашої кімнати. В електролампочках світяться дуже тонкі розжарені електричним струмом нитки з чистого вольфраму, струм же до них підводиться електропроводами з чистої міді. У складі електролампочки ви знайдете ту саму латунь, чистий цинк (з нього звичайно роблять патрон), припій — легкоплавкий сплав олова із свинцем і сурмою. Він настільки м'який, що його можна зрізати з цоколя перегорілої лампочки ножем. З припою складається нижній контакт електролампочки і спай патрона з дротинкою, що підводить струм до нитки розжарення, сама ж ця дротинка з платиніту — сплаву заліза з нікелем.

Але список металів, що обслуговують нас, далеко ще не вичерпаний. Ми випустили з уваги стінний термометр — скляну трубочку з чистою ртуттю — одним із небагатьох металів,

які перебувають у рідкому стані при звичайних температурах. Далі — настінне дзеркало. Дивлячись у нього, ми бачимо своє відображення у найтоншому шарі чистого срібла, нанесеному на задню поверхню скляної пластинки. Потім цвяхи із заліза, хромовані або нікельовані (тобто покриті тонким шаром чистого нікелю або хрому) вироби, статуетки з бронзи — сплаву міді з оловом... Але і це далеко не все.



Якщо такий простий прилад, як електролампочка, включає в себе не менш як сім металів, можна легко собі уявити, як поповнився б список металів, що обслуговують нас, якби у наше поле зору потрапив такий складний прилад, як телевізор. Ще більше число їх входить в автомобіль або літак.

ЯК ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛІВ ПОВ'ЯЗАНО З ЇХ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Метали ми пізнаємо серед інших речовин по їх особливому, металічному блиску. Блищать вони тому, що відбивають промені світла, які падають на них, а не пропускають їх крізь себе, як скло, і майже не вбирають, як сажа. Це загальна властивість металів. Але найяскравіше вона виявляється у срібла. Ось чому його вживають для виготовлення дзеркал, іноді, проте, його заміняють алюмінієм. Метали добре відбивають не тільки видиме світло, але й невидимі радіохвилі. Тому металеві дзеркала використовуються також у радіотелескопах, які вловлюють радіовипромінювання Сонця, Місяця, Млечної Путі і «радіотуманностей», та в радіолокаторах, які виявляють літаки на відстані сотень кілометрів від спостерігачів.

Така ж загальна властивість металів — електропровідність. Без металів неможливо було б передавати по проводах електричну енергію на десятки і сотні кілометрів від електростанції, що виробляє її, або розмовляти телефоном. Тут на першому місці серед металів стоїть знову срібло, а дуже близько до нього примикає мідь. Ось чому електропроводи роблять із чистої міді. А втім, чистий алюміній проводить струм навіть краще, ніж мідь, якщо виготувати з нього проводи більшої товщини, ніж мідні, але однакової з ними ваги. Тому в електротехніці алюміній, оскільки він значно дешевший за мідь, частково замінює її.

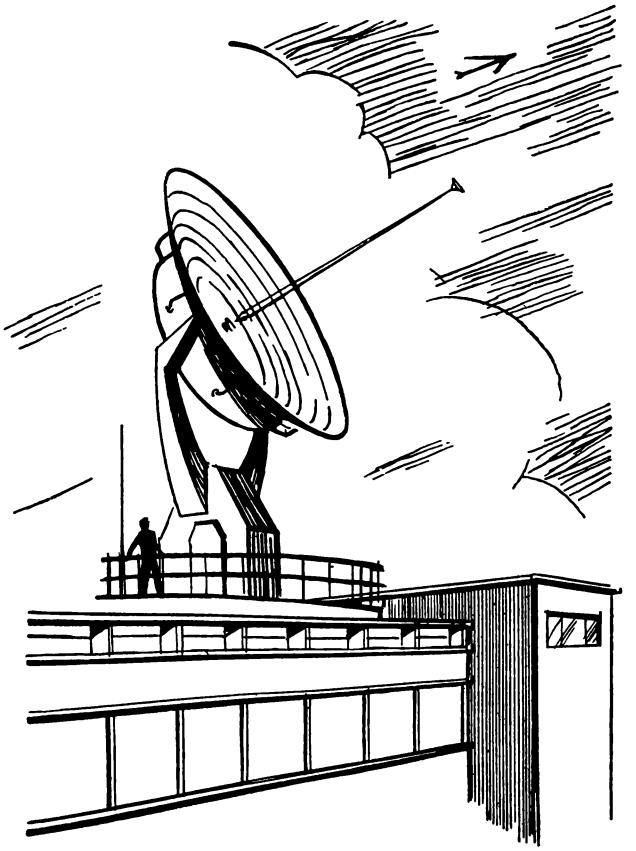
Нитка розжарення електролампочки розжарюється коштом опору, який вона чинить електричному струмові, тому для виготовлення її, навпаки, потрібний метал з порівняно малою електропровідністю. Таких металів багато, але з них вибрано вольфрам, тому що при досить малій електропровідності він перевищує всі метали тугоплавкістю. Нитки з більшості інших металів при вмиканні електролампочки або миттю плавились би, або в короткий час випаровувались.

Ось у чому причина надзвичайно великої кількості металевих матеріалів, що обслуговують наше життя: для кожного металевого виробу і кожної металевої деталі підбирають або створюють «на замовлення» такий самий метал або металевий сплав, який найкраще задовольняє призначення виробу або деталі.

Електричне освітлення перетворилось би в електричне опалення, якби, навпаки, електропроводка виготовлена була із вольфраму, а нитки розжарення — з міді. Такі електролампочки не стали б світитися, а електропроводка випромінювала б у кімнату потоки тепла.

Але чому ж із вольфраму не роблять спіралі для електроплиток? Це знову було б грубою помилкою. Не тільки тому, що вольфрам — надто дорогий метал, але й тому, що він витримує тривале розжарення тільки у вакуумі або в хімічно інертному газі. На повітрі ж він швидко окислюється.

Отже, нове призначення вимагає нового, спеціально для нього пристосованого металевого матеріалу.



Радіолокатор.

СПЛАВИ

Техніка потребує металевих матеріалів із найрізноманітнішими властивостями і поєднаннями властивостей. Так, для виготовлення друкарського шрифту, яким надруковано цю книгу, потрібний був металевий матеріал досить легкоплавкий (щоб із нього легко було відлити літери) і водночас досить твердий (бо інакше літери зносились би раніше, ніж був видрукований весь тираж). При цьому сплав повинен точно відтворювати форму, в якій відливаються літери. У списку чистих металів такого металу, в якому поєднувались би всі задані властивості, немає. Свинець легкоплавкий, але надто м'який, його можна дряпати навіть нігтем. Сурма легкоплавка і досить тверда, але надто крихка.

Сплав же свинцю з сурмою і незначною кількістю олова має плавкість свинцю і твердість сурми, але позбавлений її крихкості. У момент затвердніння цей сплав злегка розширюється і тому точно відтворює форму, в яку він відлитий. Уся ця сума властивостей, а не кожна зокрема і робить наш сплав майже незамінним друкарським металом.

Інша властивість свинцю — його висока питома вага — використовується, наприклад, для виготовлення мисливського дробу. Але й тут шкодить справі м'якість свинцю. Внаслідок величезного тиску порохових газів при пострілі дробинки із свинцю розплющуються і рушничний ствол зсередини «освинцьовується» — покривається шаром свинцю. Замінити його іншим металом? Платина досить тверда і при цьому майже вдвоє важча за свинець. Але вона надто дорога, і в неї інше призначення. Кожний постріл платиновим дробом або кулею коштував би невимірно дорожче, ніж убита дичина. Замість того щоб шукати серед металів замінники свинцю, простіше «виправити» його, сплавивши свинець з невеликою кількістю тієї самої сурми.

Не подумайте, що при сплавлюванні металів властивості їх просто складаються або ж що властивості сплавів являють собою щось середнє між властивостями сплавлених металів. Друкарський сплав плавиться при нижчій температурі, ніж кожний із металів, що входять до його складу. Ще більш легкоплавкі припої у відповідності з їх призначенням з'єднувати, спаювати металеві частини. Але ж припій складається з тих самих металів — свинцю, олова і сурми. Так, найпростіший з

припоїв — т р е т н и к, що складається на одну третину з свинцю і на дві третини з олова, —плавиться при 181°, тим часом як точка плавлення свинцю 327°, а олова 232°. Особливо легкоплавкі сплави вісмуту, хоч сам він плавиться лише при 271°. З вісмутового сплаву з точкою плавлення усього 60° виготовляють кільця, що удержують пробки в автоматичному устаткуванні, яке являє собою водопровідну сітку, прокладену по стелі будинку. У труби стінки вгвинчені спринклери. При виникненні пожежі кільця у спринклерах плавляться, пробки напором води викидаються і відкривають воді шлях до вогню (рис. 1). Таку сітку влаштовують у театрах, на складах горючих матеріалів, на деревообробних і текстильних підприємствах.

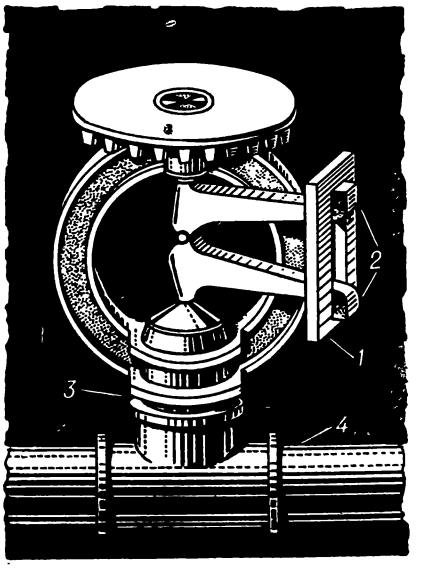


Рис. 1. Будова спринклера: 1 — легкоплавке кільце; 2 — пробка; 3— з'єднання з водопровідною трубою; 4 — водопровідна труба.

Сплавляючи одні і ті самі метали, але в різній пропорції, можна діставати сплави з різними властивостями і різного призначення.

Корпус вашого ручного годинника, можливо, виготовлено із х р о м о н і к е л е в о ї сталі, а пружину — вже обов'язково з нікелевого сплаву — е л і н в а р у. До складу нержавіючої сталі входить 18% Cr, 9% Ni, а до складу елінвару — 10% Cr, 36% Ni. Саме завдяки такому складові елінвар виявляє властивість, що робить його незамінним при виготовленні пружин: незрівнянну пружність, яка майже не змінюється при коливаннях температури — від самих лютих морозів до самої сильної літньої спеки. При іншому співвідношенні тих же складових частин, наприклад 20% Cr, 80% Ni, утворюється н і х р о м — сплав з низькою електропровідністю і високою жаротривкістю, який вживається в електронагрівальних приладах (наприклад в електроплитках).

Сплав заліза з 46% Ni має однаковий із склом і платиною коефіцієнт розширення при нагріванні. Це п л а т и н і т. Без платинітової дротинки, впаяної у скляну оболонку електролампочки, не можна було б підвести струм до нитки розжарення, бо інші металеві матеріали (крім надто дорогої платини) при зміні температури розширюються або більше, або менше, ніж скло, і зчеплення металу із склом порушується.

Сплави надзвичайно різноманітні за складом, властивостями і призначенням. Але в сучасній техніці найбільше застосовуються вуглецеві і л е г о в а н і с т а л і, основу яких складає сплав заліза з вуглецем.

ЧИМ ЧАВУНИ ВІДРІЗНЯЮТЬСЯ ВІД СТАЛЕЙ

Заліза добувається із надр землі більше, ніж будь-якого іншого металу. Але чистого заліза ви не бачили. Цей сріблястий метал надто м'який, а тому мало придатний для виготовлення виробів (крім сердечників електромагнітів). У промисловості, в будівництві, в хатньому побуті вживають не чисте залізо, а найрізноманітніші залізні сплави — ч а в у н и і с т а л і.

Вони дуже різняться один від одного своїми властивостями. Стальним пером ви легко видряпаєте своє прізвище на чавунній сковорідці. Чавунний же осколок буде тільки ковзати по поверхні стальних ковзанів і жодної шкоди їм не спричинить. Величезна більшість сталей твердіша за чавун.

Хоч як старайтесь, вам не вдасться зігнути чавунну сковорідку: при великому зусиллі вона не витримає — хрусне, зламається, але не зігнеться. Лезо ж стального обіднього ножа згинається і знову випрямляється. Чавун крихкий, а сталь пружна. А втім, пружність сталі має свою межу: лезо ножа не можна зігнути в дугу — воно зламається.

Кожного дня, заводячи годинник, ви скручуєте годинникову пружину. Заведена пружина розкручується, тягне шестірні-колесики — годинник іде. Він служить вам багато років, і день у день, 365 раз на рік, скручується і розкручується пружина, не втрачаючи пружності.

Як ми вже говорили, такі пружини роблять з особливо пружної сталі.

Стрімливо обертається свердло свердлиль-

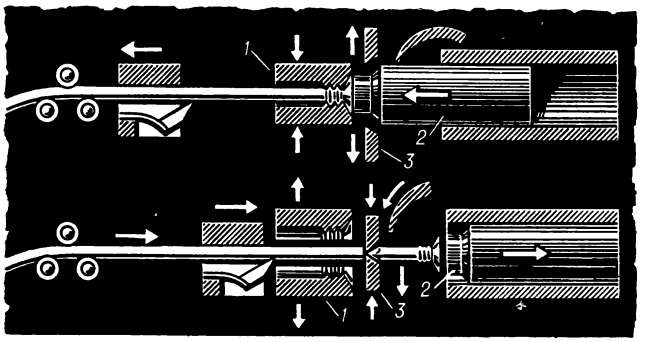


Рис. 2. Виготовлення цвяхів на пресах-автоматах: вверху — процес виготовлення головки; внизу — загострення кінця цвяха (1 — матриці, 2 — пуансон, 3 — відкушуючі ножі).

ного верстата, дедалі глибше встромлюючись у стальну плиту. Через короткий час у плиті з'являється наскрізний отвір. Такі свердла, а також різці виготовлені з особливої, швидкорізальної сталі.

Металурги виготовляють сотні різноманітних сортів («марок») сталей, десятки сортів чавуну. В усіх них обов'язково міститься вуглець. Тому чавуни і сталі називають залізовуглецевими сплавами.

Найбільше вуглецю (більш як 2%) містять чавуни. У сталях вуглецю менше 2%; зовсім мало його у м'яких сталях, або ковкому залізі. З ковкого заліза прокатують листи покрівельного заліза, протягають дріт; із залізного дроту роблять на пресах-автоматах цвяхи. Удар молотка-пуансона по кінчику дроту, що виступає з матриці, — і він сплющений у головку майбутнього цвяха. Удар відкушуючих ножів — і від дроту відокремлюється готовий цвях із загостреним кінцем (рис. 2).

М'якість і податливість ковкого заліза порівняно з твердими сталями і чавунами корисна не тільки при виготовленні з нього дроту або цвяхів, а іноді і при застосуванні виготовленої з нього продукції. Так, шевські цвяхи, щоб не дряпати підлоги, повинні стиратись разом із шкірою.

За хімічним складом чавуни і сталі відрізняються один від одного не тільки вмістом вуглецю. До складу залізовуглецевих сплавів входять у невеликих кількостях і інші елементи — неметали (кремній, фосфор, сірка) і метали. Збільшуючи вміст одних елементів, зменшуючи вміст інших, вводячи різноманітні легуючі метали (хром, ванадій, титан та ін.), металурги дістають різноманітні спеціальні сталі. Одні з них мають чудову пружність, інші «надтверді», треті не зазнають корозії ні на повітрі, ні у воді.

Величезна галузь нашої промисловості, завданням якої є виготовлення чавунів, сталей і ковкого заліза, називається чорною металургією, а самі залізовуглецеві сплави — чорними металами.

ЯКІ БУВАЮТЬ ЧАВУНИ

Якщо залізний дріт нагрівати електричним струмом, то спочатку він дедалі більше провисає — від нагрівання залізо розширюється. При 760° дріт без усяких видимих змін відразу перестає притягатися магнітом. А при 906° із

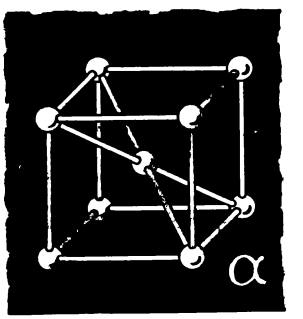


Рис. 3. Розташування атомів в альфа-залізі.

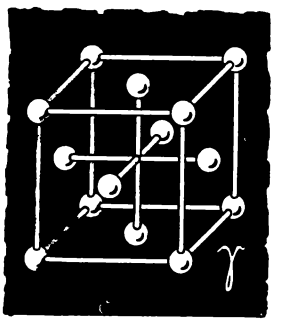


Рис. 4. Розташування атомів у гамма-залізі.

залізом відбувається нова зміна: дріт раптово натягається, тобто стискується, об'єм заліза зменшується. При цій температурі розташування атомів у залізі змінюється і звичайне залізо, або альфа-залізо (рис. 3), перетворюється у гамма-залізо (рис. 4). Одна з відмін гамма-заліза від альфа-заліза полягає у здатності гамма-заліза навуглецьовуватись: воно вбирає в себе вуглець, як губка вбирає воду, доки не насититься ним. Нарешті, при 1539° залізо плавиться, перетворюючись у рухому рідину, що легко розплескується. Рідке залізо ще жадібніше вбирає вуглець, ніж тверде гамма-залізо.

Залізо виплавляють з його руд за допомогою коксу. Останній якраз і являє собою майже чистий вуглець. Тому сліпуче блискуча струмина, що виривається за сигналом доменщика з доменної печі і з шумом падає у ківш,— це не чисте залізо, а розчин вуглецю у рідкому залізі — ч а в у н.

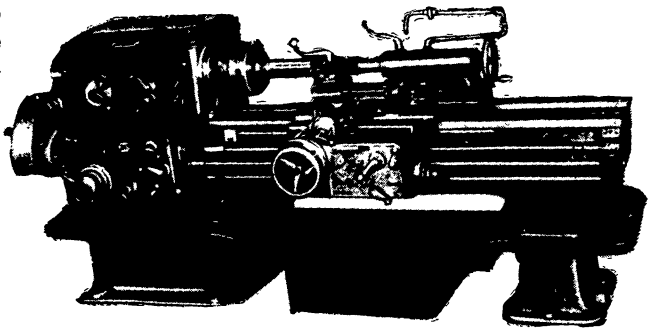
Що ж відбудеться при затвердінні рідкого чавуну? Рідке залізо почне перетворюватись у кристали заліза. Але ці кристали неспроможні удержати в собі всього вуглецю, що розчинився. Надлишок вуглецю виділяється у вигляді графіту, утворюється с і р и й ч а в у н.

Відливок із сірого чавуну складається з кристалів заліза, перешарованих тонкими широкими лусочками графіту. Рис. 5 показує, який вигляд має поверхня сірого чавуну під мікроскопом. Тонкі, немов тріщинки, смужки, що розсікають рисунок в усіх напрямах,— це і є розрізані впоперек пластинки графіту. Графітові лусочки легко розщеплюються, як спресована стопка паперу. Тому графіт — «слабке» місце сірого чавуну. При ударі відливок із сірого чавуну розбивається на куски вздовж прошарків графіту, так наче б прошарки графіту і справді є тріщинками. Тьмяний сірий колір графіту виявляється у зломі чавуну. Тепер зрозуміло, чому такий чавун добре відливається у форми, але крихкий і кувати його не можна.

Із сірого чавуну відливають станини машин, махові колеса, плити, каналізаційні труби.

Тепер подивіться на рис. 6. Такий вигляд має під мікроскопом відшліфована поверхня в и с о к о м і ц н о г о ч а в у н у, вперше добутого в СРСР. Він утворився при твердненні звичайного чавуну. Але графіт тепер не розсікає відливок тонкими пластинками, він «блокований» в окремих ділянках у вигляді включень кулястої форми. Це досягнуто тим, що в розплавлений чавун перед розливанням його у форми ввели незначну кількість магнію. Тому з високоміцного чавуну можна відливати і такі відповідальні деталі, як колінчастий вал потужного суднового двигуна.

На прикладі високоміцного чавуну ми познайомились з одним із способів змінювати на замовлення властивості сплавів — із застосуванням м о д и ф і к а т о р і в. При модифікуванні хімічний склад сплаву не змінюється: адже високоміцний чавун за складом практично нічим не відрізняється від звичайного. Змінюються лише форма, розміри і розташування



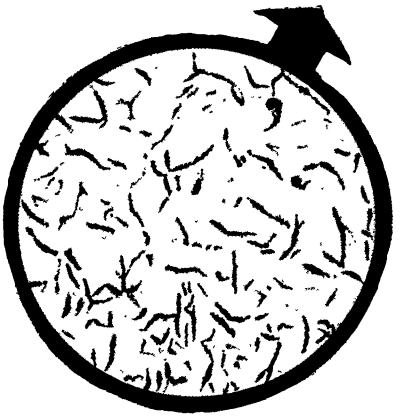


Рис. 5.

кристалів тих речовин, з яких сплав утворений.

При швидкому твердненні чавуну в особливих умовах надлишковий вуглець виділяється не у вигляді графіту, а у вигляді блискучих білих кристалів ц е м е н т и т у — хімічної сполуки вуглецю із залізом (Fe_3C). У протилежність графіту цементит дуже твердий, але разом з тим дуже крихкий. Завдяки йому дуже твердий і крихкий також б і л и й ч а в у н.

Коли білий чавун витримують протягом кількох днів при високій температурі, цементит, що міститься в ньому, поступово розкладається, з нього виділяється вуглець у вигляді таких же кулястих скупчень, як і при модифікуванні чавуну. Так добувається ще один вид чавуну — к о в к и й ч а в у н.

На прикладі білого і ковкого чавуну ми познайомились ще з одним, найважливішим способом зміни властивостей сплавів — з т е р м і ч н о ю о б р о б к о ю.

ЯК ЗАГАРТОВУЮТЬ І ВІДПУСКАЮТЬ СТАЛЬ

Більшість чавуну, що виплавляється у доменних печах, переробляється на сталь. Для цього із розплавленого чавуну випалюють вуглець, але не до кінця, а лише доти, доки його залишиться не більш як 2%.

Для кожного стального виробу потрібно підібрати найпридатніший сорт сталі. Так, залізничні колеса бажано виготовляти з м'якої, а тому в'язкої сталі, їх ободи (бандажі) — з твердішої сталі, бо інакше при терті об рейки колеса швидко зітруться, а осі, на які насаджені колеса, — із ще твердішої сталі.

Твердості сталі надає вуглець, що міститься в ній. Але ось що вийшло при забиванні трьох цвяхів у тверде дерево: один із них зломився при першому ударі, другий затупився, зігнувся, і головка його розплющилась. І тільки третій слухняно увійшов у дерево. А тим часом усі три цвяхи виготовлені з тої самої марки сталі, з тим самим вмістом вуглецю. У чому ж тут секрет? Справа в тому, що цвяхи пройшли різну термічну обробку.

Двигуном у нашому годиннику служить стальна пружина, виготовлена на заводі. Заводячи годинник, ми її скручуємо. Намагаючись набути початкової форми, пружинка поступово розкручується і приводить у дію весь тонкий і складний механізм годинника. Але якщо пружинку перекрутити, вона зламається. Пружність і крихкість — ось які дві властивості сталі виявляються тут. Перша властивість поряд з твердістю робить сталь майже незамінним виробним матеріалом. З другою ж властивістю мимоволі доводиться миритись. Ці властивості стальний виріб дістає під час гартування. Для гартування його нагрівають, але не до температури плавлення, а лише до перетворення альфа-заліза у гамма-залізо і дають час атомам вуглецю проникнути в його кристали. Гамма-залізо здатне вбирати в себе до 2% вуглецю, але ж у сталях і міститься не більше 2% вуглецю.

Якщо тепер виріб повільно охолодити, в ньому відбудеться те саме, що і в чавуні, який твердне: звільнення заліза від розчиненого в ньому вуглецю.

Проробіть цю операцію із стальним пером, голкою або кусочком стального дроту, і ви переконаєтесь, що матеріал змінився до невпізнання. Він тепер зовсім легко і слухняно згинається не ламаючись і вже не повертається до початкової форми. Пружність і твердість, а разом з тим і крихкість втрачені. Знову нагрійте до червоного ваш виріб, але охолодіть його на цей раз швидко, кинувши в холодну воду. В результаті ви добудете усе ту саму тверду, пружну, але крихку загартовану сталь.

Що ж відбувається при гартуванні стального виробу? Атоми вуглецю внаслідок швидкості охолодження не встигають виділитись із кристалів заліза. Ці «застрялі» атоми і надають особливих властивостей загартованій сталі.

Гартуванням термічна обробка стального виробу не закінчується. У загартованому стані сталь дістає найвищу твердість, але стає такою ж крихкою, як той самий чавун. Щоб повернути їй знищені гартуванням якості, виріб піддають останній операції — в і д п у с к у. Його ще раз нагрівають, але до порівняно невисокої температури. Стальний інструмент відпускається при температурах усього 120—150°. При цьому твердість його майже не знижується, а крихкість зменшується. Для пружин і ресор збереження високої твердості неістотне, тому їх піддають відпуску при вищих температурах (300—400°), при яких коштом значної втрати твердості досягається найбільша пружність.

ЛЕГОВАНІ СТАЛІ

Сталь залишається твердою і пружною лише доти, доки вона загартована, тобто доки вуглець залишається розчиненим у залізі. Але при нагріванні гартування сталі зникає, вона стає м'якою. Тому різці і свердла із звичайної сталі не витримують значного нагрівання в процесі їх застосування. Тут на допомогу приходить в о л ь ф р а м — той самий метал, з якого виготовлено нитку вашої електролампочки. Додавання до сталі при її виплавці близько 20% вольфраму дозволяє вуглецю удержуватись в твердому розчині аж до температур червоного жару. Так роблять ш в и д к о р і з а л ь н у і н с т р у м е н т а л ь н у с т а л ь, яка зберігає твердість навіть при червоному жарі. Застосування різців із такої сталі дозволяє дуже збільшити швидкість різання металу, у багато разів підвищити продуктивність металообробних верстатів.

Швидкорізальна сталь належить до сталей

легованих, тобто таких, що містять, крім вуглецю, додаткові елементи.

Як різноманітні застосування сталі — від стального пера до реактивного літака, який простромлює простір з надзвуковою швидкістю,— так різноманітні і вимоги, що ставляться до неї в кожному випадку. Багато з них металург може задовольнити, ускладнюючи склад сталі тими чи іншими легуючими елементами. І тільки тоді, коли ці можливості цілком вичерпані, він відмовляється від сталі і звертається до інших сплавів. Таким чином за замовленням металообробної промисловості був створений победіт — беззалізний надтвердий сплав з карбіду (тобто сполуки з вуглецем) того ж вольфраму з кобальтом. Застосування надтвердих сплавів дозволяє ще далі збільшувати швидкість різання металів — до десятків метрів за секунду.

У ТЕХНІКУ ПРИХОДЯТЬ НОВІ МЕТАЛИ

Протягом століть людина не зазнавала потреби в інших металах, крім заліза. У XIX ст. поширення машин і розвиток залізничного транспорту спричинили стрімливий ріст виробництва чавуну і особливо сталей. Разом з тим з'явились і зовсім нові споживачі металів, такі, як електротехніка, авіація. Слідом за залізом почався швидкий розвиток виробництва міді для електропромисловості. Для завоювання ж повітряної стихії потрібні були цілком нові метали — міцні, як сталь, але на відміну від неї легкі. І хімія з допомогою електропромисловості доставила такий матеріал. Це був алюміній.

Перші зливки алюмінію, що з'явились на промисловій виставці під рекламною назвою «срібло з глини», вразили уяву відвідувачів. Люди звикли до великої питомої ваги металів і не хотіли вірити, що тут немає ніякого фокусу, що зливки не порожні всередині. Але в майбутнє нового металу ще важко було повірити, бо він коштував мало не стільки само, скільки золото. Проте внаслідок швидкого здешевлення електроенергії ціна на алюміній швидко знижувалась. Незабаром новий метал став доступним для найширшого застосування, але, звичайно, знов-таки не в чистому вигляді.

Чистий алюміній м'який і податливий ще в більшій мірі, ніж чисте залізо. Але сплавлюванням алюмінію з невеликими кількостями інших металів (міді і марганцю) добуто було алюмінієві сплави — тверді, міцні, пружні, що наближаються за конструктивними якостями до сталей при майже втроє меншій питомій вазі (2,8 проти 7,87).

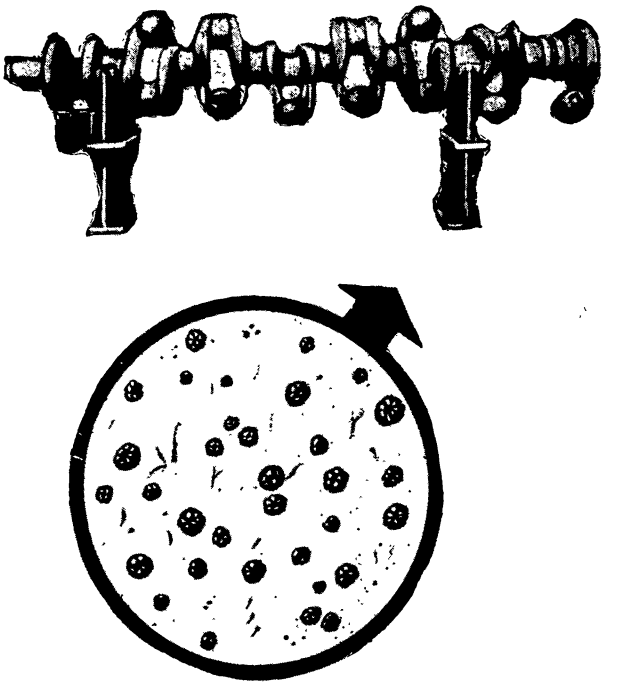


Рис. 6.

З часом і в алюмінію з'явився досить серйозний суперник. Це був магній, сплави якого при цілком задовільних механічних якостях мали ще меншу питому вагу — 1,8.

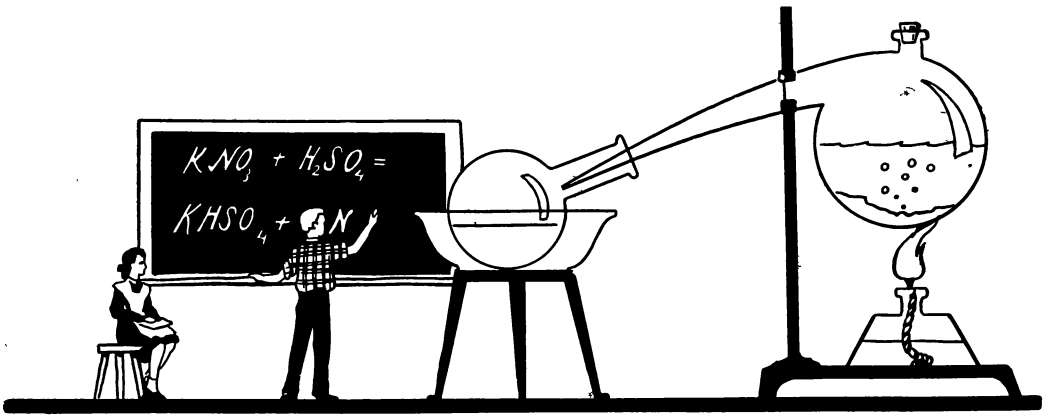
Здавалося, що завдання забезпечення авіації легкими і міцними конструктивними матеріалами розв'язане. Але авіація вступила в новий етап. Подолавши бар'єр швидкості звуку, вона несподівано зустрілась з новим, «тепловим» бар'єром. Тертя літальної машини при надзвуковій швидкості об повітря було настільки сильним, що алюмінієві і магнієві сплави не витримали цього випробування: запас міцності їх виявився вичерпаним. І знову постало питання про новий метал, досить легкий і здатний витримувати сильне нагрівання без значного зменшення міцності. У наші дні таким металом став титан.

Титанові сплави мають не таку вже малу питому вагу — 4,5—5. Але це надолужується їх високою жаротривкістю. До того ж титанові сплави не зазнають руйнуючого діяння навіть

морської води. Пластинка з титану, що пробула кілька років у морській воді, не мала жодних ознак корозії. Таким чином, титан став щасливою знахідкою не тільки для авіації, але й для суднобудування.

XX ст. часто називають віком атомної енергії, завоювання Космосу і пластичних мас. Але хоч пластичні маси і приходять на зміну кольоровим металам у багатьох галузях техніки, це не означає, що вік металів закінчився. Сучасна наука і техніка, як і раніше, немислимі без металів. І виробництво машин, і будівельна справа, і транспорт, і атомні електростанції, і космічні ракети — всі вони потребують металів.

Ось чому в рішеннях XXI з'їзду КПРС поряд з високими темпами росту випуску пластичних мас передбачається різке збільшення виробництва чорних і кольорових металів і в першу чергу легованих сталей, міді і алюмінію, а також титану і рідкісних металів.



Хімічна реакція

ХІМІЧНА ВЗАЄМОДІЯ І КАТАЛІЗ

Недалеко від Москви на залізничній станції в тупику стояла 25-тонна цистерна, яка нічим не відрізнялась від сотень подібних до неї, але залізничники поглядали на неї з побоюванням. Цистерна була з соляною кислотою, страшним ворогом металу, особливо стальних рейок. В історії залізничних аварій записано немало катастроф, спричинених необережним перевезенням соляної кислоти, що попала на рейки і зруйнувала їх.

Чому ж соляна кислота, яка так швидко руйнує залізні і стальні вироби, не зруйнувала стальних стінок цистерни?

Справа в тому, що до соляної кислоти добавлено було невелику кількість, близько 1%, речовини, яка сповільнює розчинення заліза в кислоті. А чи змінюються при цьому інші властивості кислоти? Виявляється, ні.

Діяння такого роду добавок, що сповільнюють розчинення металу в кислоті, ви можете самі спостерігати на простому досліді. Для цього вам тільки доведеться купити в аптеці таблетки уротропіну. Опустіть залізний цвях у розчин соляної кислоти. Цвях, звичайно, розчинятиметься, вкриваючись бульбашками водню, що виділяється при цьому. Добавте тепер до розчину кислоти трохи уротропіну, і виділення водню майже цілком припиниться. Так «стороння» речовина, якою є уротропін, може сповільнювати, а в деяких випадках практично зупиняти розчинення металу в кислоті.

Властивості кислоти при цьому не змінюються. Якщо ви кинете у склянку з кислотою,

до якої додано уротропін, кусочок крейди, то кислота буде так само бурхливо взаємодіяти з крейдою, як і без уротропіну, виділяючи вуглекислий газ.

Є цілий ряд речовин, добавляння яких сповільнює взаємодію кислоти з металом. А чи не можна, користуючись іншими добавками, прискорювати хімічну взаємодію речовин?

Зробимо такий дослід. Наллємо у склянку розчин йодистого калію і сірчаної кислоти. При взаємодії йодистого калію з кислотою утворюється йодистоводнева кислота, з якої при додаванні перекису водню виділяється вільний йод.

Йод легко виявити, якщо прилити трохи слабкого розчину крохмалю — розчин посиніє. При звичайних умовах реакція відбувається дуже повільно і слабке потемніння з'являється лише через 1—2 години (див. кольорову таблицю на стор. 640).

Поставимо цей дослід інакше. Склянку перед цим обполіснемо слабким розчином будь-якої солі молібдену. Вилivши розчин солі молібдену, вимиємо склянку водою і тільки після цього наллємо у цю склянку розчини йодистого калію і сірчаної кислоти, а також трохи крохмалю. Посиніння з'явиться вмить.

Виявляється, досить ледве вловних слідів сторонньої речовини, у даному випадку солі молібдену, щоб реакція у багато разів прискорилась.

У ролі прискорювача дуже часто виступає і вода. Суміш порошкоподібного алюмінію і кристалічного йоду, перед тим розтертого в порошок, не показує видимих змін. Але досить на цю суміш пустити краплю води, і станеться спалах — результат бурхливої взаємодії йоду з алюмінієм (див. ту саму кольорову таблицю).

При нагріванні в пробірці порошок бертолетової солі спочатку розплавиться, а потім почне розкладатись з виділенням кисню. Але реакція йде настільки повільно, що тліюча скалка, внесена в пробірку, не спалахне. Якщо ж у розплавлену бертолетову сіль добавити трохи чорного порошку двоокису марганцю, відбудеться бурхливий розклад солі і тліюча скалка, внесена в пробірку, спалахне яскравим полум'ям. Коли бертолетова сіль цілком розкладеться, у пробірці залишиться хлористий калій і... усе той самий двоокис марганцю.

У гніт звичайного спиртового пальника вставимо платинову дротину, закручену зверху у вигляді спіралі. Підпалимо гніт і, коли дротина розжариться, погасимо полум'я. Дріт продовжує яскраво світитись доти, доки в пальнику є спирт (див. ту саму кольорову таблицю).

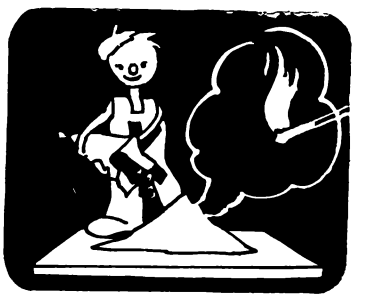
Відбувається, як кажуть, безполум'яне горіння. Платинова дротина прискорює процес окислення (горіння). Після цієї реакції хімічні властивості платинової дротини не змінюються. В усіх цих дослідах платина, вода, двоокис марганцю, уротропін залишаються незмінними, але під їх впливом змінюється швидкість тієї чи іншої реакції. В одних випадках реакція гальмується, в інших — прискорюється.

Такі речовини, які змінюють швидкість хімічних реакцій, а самі наприкінці реакції залишаються хімічно незмінними, дістали назву **каталізаторів** (від грецького слова «каталюзис», що значить «руйнування»).

ВИДИ КАТАЛІЗУ

Каталізатори, які сповільнюють хімічні реакції, називаються негативними каталізаторами, або **інгібіторами**. У нашому прикладі уротропін є інгібітором розчинення заліза у соляній чи сірчаній кислоті.

Вода прискорює реакцію між алюмінієм і кристалічним йодом.



Двоокис марганцю прискорює реакцію виділення кисню в бертолетовій солі.

Каталізатори, які прискорюють хімічні реакції, називаються позитивними каталізаторами.

Розрізняють гомогенний і гетерогенний каталізи. У тому випадку, коли реагуючі речовини утворюють однорідну масу з каталізатором, наприклад, коли всі речовини знаходяться в рідкому або газоподібному стані, говорять про гомогенний каталіз. Гетерогенний каталіз визначається різним станом каталізатора і реагуючих речовин. Так, реакція йодистоводневої кислоти з перекисом водню в присутності розчину молібденової солі є прикладом гомогенного каталізу, а безполум'яне горіння в присутності платинового дроту служить прикладом гетерогенного каталізу.

Чи є каталізатори сторонніми речовинами в хімічних реакціях? Розглянемо каталітичну реакцію добування діетилового ефіру. Добувається ця речовина з винного (етилового) спирту. До етилового спирту додають трохи сірчаної кислоти і суміш нагрівають до 140°. При цьому утворюється етилсірчана кислота:

$$\underset{\text{етиловий спирт}}{C_2H_5OH} + \underset{\text{сірчана кислота}}{H_2SO_4} \rightarrow \underset{\text{етилсірчана кислота}}{C_2H_5OSO_2OH} + H_2O. \quad (1)$$

Етилсірчана кислота взаємодіє в свою чергу з новими порціями спирту, які весь час додають у реакційну посудину:

$$C_2H_5OSO_2OH + C_2H_5OH \rightarrow \underset{\text{діетиловий ефір}}{C_2H_5OC_2H_5} + H_2SO_4. \quad (2)$$

В результаті утворюється діетиловий ефір, а сірчана кислота звільняється, щоб взяти участь у перетворенні нових порцій спирту в ефір.

Таким чином, з допомогою невеликої кількості сірчаної кислоти можна перетворити в ефір великі кількості спирту. Більше того, після закінчення реакції кислоти залишиться стільки ж, скільки було взято.

Але хіба кислота в процесі реакції була сторонньою речовиною? Адже вона брала діяльну участь в реакції, входячи до складу проміжної сполуки — етилсірчаної кислоти. Тому говорити, що каталізатор є сторонньою речовиною, неправильно.

У випадку розкладу бертолетової солі з допомогою двоокису марганцю теж спочатку утворюється проміжна сполука, яка легко розпадається на кисень і двоокис марганцю.

ТРОХИ ІСТОРІЇ

Важко сказати, коли вперше люди почали практично користуватись каталізаторами. Додавання дріжджів у тісто при випіканні хліба,

додавання солоду при варінні пива застосовувалось віддавна.

Але наукове дослідження явищ каталізу почалось тільки наприкінці XVIII — на початку XIX ст. Сірчану кислоту у цей час добували не так, як тепер, а спалюючи сірку з селітрою. Суміш газів, що утворюється, до якої входили сірчистий газ і окисли азоту, перекачували в скляні бутлі або свинцеві камери. На дно бутлів або камер наливали воду, в якій суміш розчинялась з утворенням сірчаної кислоти.

Якщо сірку спалювали без селітри, сірчана кислота не утворювалась. У цьому випадку утворювався сірчистий ангідрид, який, розчиняючись у воді, давав не сірчану, а сірчисту кислоту.

У чому ж справа? Яку роль відіграє тут селітра? Це було встановлено в 1805 р. французькими хіміками Клеманом і Дезормом. Вони показали, що окисли азоту, які утворюються при спалюванні селітри, передають один атом кисню сірчистому ангідриду, а потім знову окислюються, приєднуючи кисень з повітря. Тому кількість окислів азоту залишається практично сталою.

Але це відкриття було забуте.

Шість років після того російський учений Костянтин Кірхгоф, досліджуючи осахарювання крохмалю, нагрівав звичайний крохмаль — картопляне борошно — з водою, злегка підкисленою сірчаною кислотою. Крохмаль спочатку перетворювався у клеєподібну речовину, так званий декстрин, а потім у виноградний цукор. Наприкінці реакції вся кислота, хоч без неї осахарювання крохмалю не відбувається, залишається невитраченою.

У 1826 р. англійський учений Деві виявив, що спирти легко окислюються повітрям до

вуглекислого газу і води в присутності платини. Це і є той дослід безполум'яного горіння, про який ми говорили вище.

Після цих відкриттів почались інтенсивні шукання нових каталізаторів і дослідження їх дії.

ОСОБЛИВОСТІ ДІЇ КАТАЛІЗАТОРІВ

Каталізатори не тільки мають чудову властивість змінювати швидкість хімічних реакцій, але й дають їм певний напрям.

Так, наприклад, звичайний (етиловий) спирт при нагріванні розкладається з утворенням газу етилену і води і водночас з утворенням водню і оцтового альдегіду. Обидві ці реакції проходять одночасно і при звичайних умовах дуже повільно. При пропусканні парів етилового спирту через нагріту перед тим трубку з окисом алюмінію спирт майже цілком розкладається на етилен і воду.

Якщо замінити у трубці каталізатор, а саме заповнити її кусочками міді, то спирт перетворюється в оцтовий альдегід і водень:

$$\text{етиловий спирт} \xrightarrow[\text{окис алюмінію}]{} C_2H_4 + H_2O \quad \xrightarrow[\text{мідь}]{} CH_3CHO + H_2. \qquad (3)$$

В одному випадку від спирту відщеплюється вода, а в другому — водень.

Отже, коли одна речовина, наприклад спирт, може одночасно реагувати у двох напрямах, то, підібравши каталізатор, можна прискорити реакцію в будь-якому одному напрямі. Ця властивість каталізатора дістала назву вибірності, або селективності.

На використанні цієї чудової властивості каталізаторів побудований промисловий метод добування штучного рідкого палива.

Справа в тому, що при реакції між окисом вуглецю і воднем, залежно від природи каталізатора і умов проведення реакції, можна дістати найрізноманітніші продукти, починаючи з горючого газу метану і кінчаючи метиловим спиртом.

Так, коли вживати як каталізатор нікель, то при атмосферному тиску з окису вуглецю і водню утворюється метан і вода:

$$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O.$$

При заміні нікелю окисом хрому або двоокисом молібдену з цих же продуктів при звичайному тиску утворюється метиловий спирт:

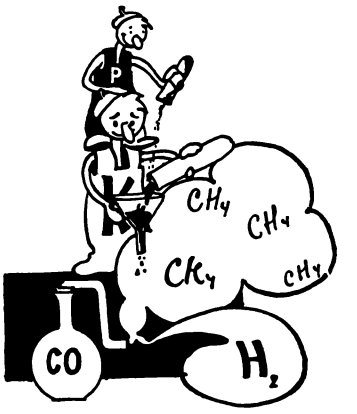
$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH.$$

Пропускаючи пару метилового спирту з повітрям крізь мідний каталізатор, добувають цінний продукт — формальдегід, який служить для виготовлення пластичних мас.

Вживаючи кобальтовий каталізатор, з окису вуглецю і водню дістають вуглеводні, що містяться у нафті.

АКТИВАТОРИ КАТАЛІЗАТОРІВ

Не всі каталізатори досить активні. Саме тому виникла думка, чи не можна і для самих каталізаторів підібрати каталізатори — речовини, які збільшували б їх активність. Виявилось, що такі речовини існують.



На нікелевому каталізаторі з CO і H_2 утворюється метан. Реакцію можна прискорити додаванням промотора — металу церію.

Ці речовини, не будучи самі каталізаторами, підвищують активність каталізаторів у десятки раз. Так, при добуванні метану з окису вуглецю і водню вживають як каталізатор нікель. Додавання до нікелевого каталізатора всього 0,5% металу церію значно підвищує активність нікелевого каталізатора.

Речовини, які самі не є каталізаторами, але підвищують активність каталізаторів, дістали назву промоторів, або активаторів.

Активатори широко застосовуються в каталітичних реакціях. Так, наприклад, п'ятиокис ванадію, що є каталізатором у реакції окислення сірчистого ангідриду в сірчаний, активується невеликими кількостями лугу.

При виробництві аміаку з водню і азоту як каталізатор звичайно застосовують залізо; активаторами тут служать окисли калію і алюмінію.

ЯКА РОЛЬ КАТАЛІЗАТОРІВ У ХІМІЧНІЙ РЕАКЦІЇ

Каталізатори прискорюють чи сповільнюють хімічні реакції. Але якщо речовина не реагує з іншою, то жодний каталізатор не

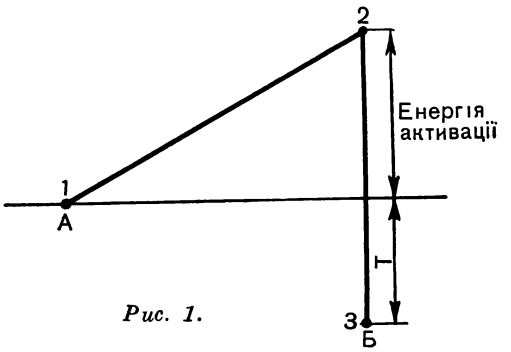


Рис. 1.

зможе спричинити хімічної взаємодії цих речовин. Отже, каталізатори впливають тільки на швидкість хімічних реакцій і їх напрям, але будь-яких нових реакцій не спричиняють.

Щоб зрозуміти дію каталізаторів, пригадаємо, що молекула, для того щоб прореагувати, обов'язково повинна зіткнутись з іншою. Але не кожне зіткнення молекул приводить до хімічної взаємодії. Щоб таке зіткнення було вдалим, або, як кажуть, ефективним, тобто щоб дві молекули прореагували, вони повинні мати достатню енергію.

До реакції приводять зіткнення тільки таких молекул, які мають певний надлишок енергії. Ця надлишкова енергія дістала назву енергії активації.

Як же можна збільшити кількість ефективних зіткнень?

Це можна зробити двома шляхами.

Перший шлях — підвищити енергію молекул, тобто збільшити число молекул, які мають надлишок енергії. Цього можна досягти нагріванням реагуючих речовин. Але цей шлях не завжди можна здійснити, тому що багато речовин не витримують високих температур.

Другий шлях — це зниження енергії активації.

Енергію активації можна уявити у вигляді своєрідного енергетичного бар'єра або огорожі, яку повинна подолати молекула, щоб вступити у реакцію. Пояснімо це з допомогою рис. 1. На ньому ми бачимо енергетичні зміни, що відбуваються під час хімічної реакції.

Візьмемо реакцію, яка проходить з виділенням тепла.

Тут вихідна речовина *А* спочатку має більший запас енергії, ніж продукт реакції *Б*. На рисунку це виражено різними рівнями. Вихідна речовина *А* знаходиться на рівні першому, а продукт реакції — на рівні третьому, нижчому. Різниця рівнів — першого і третього — відповідає теплоті *Т*, що виділяється в результаті реакції.

Але для того щоб молекула могла спуститися з першого рівня на третій, їй потрібно подолати так званий енергетичний бар'єр, показаний на рисунку рівнем другим.

Від вершини 2 молекула речовини *А* може вже без перешкод спуститись на рівень 3. Різниця рівнів першого і другого і є енергія активації, тобто та надлишкова енергія, яка потрібна для того, щоб молекули вступили в реакцію.

Роль каталізатора сходить до того, що він зменшує енергію активації і тим самим сприяє взаємодії більшої кількості молекул одна з одною.

На рис. 2 зображено лижника, що спускається з гори. Йому ще потрібно підійнятись на дальшу гору. Він підійметься на неї в тому випадку, коли швидкість його досить велика. Але йому можна серйозно допомогти в подоланні цієї гірки, якщо на якомусь рівні проробити крізь неї тунель.

Роль каталізатора і сходить до того, що він немовби утворює тунель в енергетичному бар'єрі і тим сприяє його подоланню.

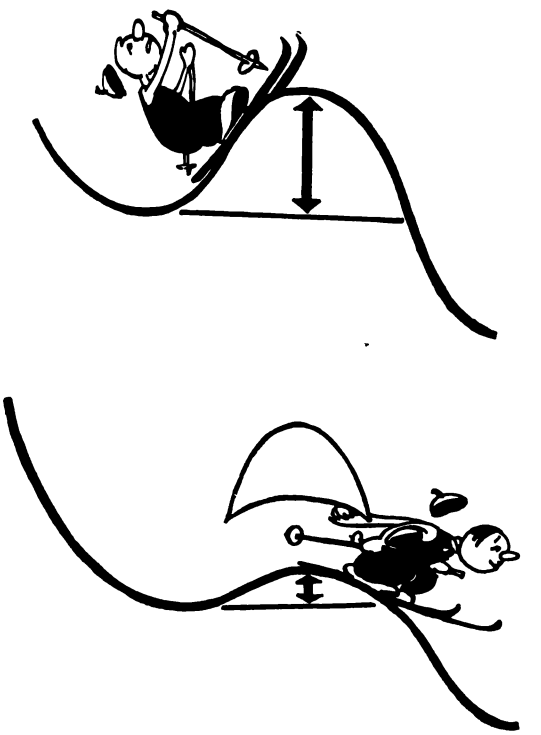


Рис. 2.

ЯК ЖЕ ДІЄ КАТАЛІЗАТОР

Дослідження показали, що механізм дії каталізаторів може бути різний.

Розглянемо деякі приклади. Припустимо, що молекула A сполучається з молекулою B і утворює продукт C:

$$A + B = C. \quad (4)$$

Але ця реакція проходить дуже повільно внаслідок великої енергії активації. Хай є третя речовина K, здатна сполучатись з A і давати продукт AK:

$$A + K = AK. \quad (5)$$

Енергія активації цієї реакції мала. Утворений проміжний продукт AK реагує з B також при невеликій енергії активації:

$$AK + B = C + K. \quad (6)$$

Тут речовина K — каталізатор.

Механізм його дії ясний. Він бере участь у реакції, спрямовує її по шляху з найменшою енергією активації і кінець кінцем виділяється у вільному вигляді.

Каталізатор сприяв сполученню A з B, але сам залишився незмінним.

У досліді з бертолетовою сіллю і двоокисом марганцю спочатку утворюється сполука $Mn(MnO_4)_2$, яка легко розпадається на двоокис марганцю і кисень.

Не завжди вдається виділити проміжну сполуку у вільному стані у випадку гетерогенного каталізу, коли каталізатором є тверда речовина. Тут певна частина молекул перетворюваної речовини прилипає до її поверхні, або, як кажуть, адсорбується поверхнею. Між частинками каталізатора і молекулами перетворюваної речовини виникає зв'язок, міцність якого може змінюватись у широких межах. В ряді випадків утворення такого зв'язку потребує деякої енергії активації. Каталізатор і перетворювана речовина вступають у неміцне хімічне сполучення, яке залишається на поверхні каталізатора. Це так звана а к т и в о в а н а, або хімічна, а д с о р б ц і я. Адсорбовані молекули легко вступають в реакцію взаємодії внаслідок того, що енергія активації, потрібна для перетворення адсорбованої молекули, менша, ніж для перетворення вільної.

Адсорбована молекула змінює свій стан легше, ніж вільна, тому що зв'язок між атомами всередині молекули ослаблений за рахунок взаємодії цих атомів з каталізатором. При цьому також трохи змінюється і відстань між атомами в молекулі перетворюваної речовини.

Справа в тому, що на поверхні каталізатора є особливі, так звані активні центри, або активні ділянки. Атоми молекул притягаються цими активними ділянками. Відстань між атомами змінюється, зв'язок слабшає, і молекула стає більш реакційно активною.

Але дуже міцне сполучення речовини з активними центрами приводить до того, що каталізатор перестає діяти.

Це називають о т р у є н н я м к а т а л і з а т о р а, а речовини, що отруюють каталізатор, називають к а т а л і т и ч н и м и отрутами.

У багатьох хімічних виробництвах вихідні речовини містять каталітичні отрути, які швидко отруюють поверхню каталізатора. Так, наприклад, при добуванні сірчаної кислоти в повітрі і в сірчистому газі міститься ледве вловима кількість миш'яку і його сполук.

Миш'як є дуже сильною каталітичною отрутою. Тому вихідні продукти старанно очищають від його домішки.

Звідси випливає, що досить дуже малого числа молекул, які можуть міцно закріпитись на поверхні каталізатора, щоб припинити каталітичну реакцію.

Це і дозволяє зробити висновок, що реакція проходить не на всій поверхні каталізатора, а тільки на окремих ділянках — активних центрах. Встановлено, що у випадку залізних каталізаторів, які вживаються при синтезі аміаку, лише 0,5% їх поверхні припадає на активні центри.

ОДИН З НАЙВИДАТНІШИХ ВИНАХОДІВ ЛЮДСЬКОГО РОЗУМУ

Усім відомо, що коли до виноградного соку, або водного розчину меду, чи цукрового сиропу додати дріжджів, то ці рідини через певний час почнуть пінитись і шипіти — «бродити».

При бродінні рідини втрачають солодкий смак, тобто цукор зникає.

Куди ж зникає цукор? Чому піниться рідина?

Причина полягає в тому, що дріжджі, які являють собою колонії грибків, містять каталізатори. Але ці каталізатори вже трохи іншого типу, ніж ті, про які ми говорили вище. Основою дріжджових каталізаторів є білкові речовини.

На дні посудини, де проходить бродіння, випадають осади. Ці осади можуть зброджувати

Якщо до меду додати дріжджів, він починає пінитись і шипіти — «бродити».

нові порції цукру. Вони являють собою зерна дріжджів. Їх називають закваскою або ферментом — від латинського слова «ферментум» — закваска. У дальшому всі каталізатори білкового походження почали називати ферментами, або біокаталізаторами.

У клітинах рослин і тварин відбуваються численні процеси, без яких неможливе життя. Ферменти є прискорювачами цих процесів.

Вибірна дія у ферментів ще більша, ніж в неорганічних каталізаторів. Кожний фермент прискорює тільки одну яку-небудь реакцію: наприклад, пепсин (фермент, що міститься у шлунковому соку) розкладає білки на пептони; жири розщеплюються на гліцерин і жирні кислоти ферментом ліпазою, який виділяється підшлунковою залозою.

Крім білків і жирів, у нашій їжі містяться вуглеводи, зокрема крохмаль, що являє собою складне утворення із залишків молекул глюкози, які, сполучаючись між собою, утворюють довгі ланцюжки з розгалуженнями.

На рисунку показані частинки крохмалю. Кожний кружечок позначає одну частинку глюкози. Будова молекули крохмалю, як видно з рисунка, складна. Тут розрізняють внутрішні і зовнішні ланцюжки.

Внутрішні ланцюжки — це невеликі групи, що складаються з 3 — 4 частинок, а зовнішні — з 6—7 частинок глюкози.

Крохмаль розщеплюється в процесі травлення під дією ферменту амілази. Але виявляється, що існує амілаза двох видів: альфа-амілаза і бета-амілаза.

Бета-амілаза діє тільки на бічні, зовнішні групи молекул крохмалю, відщеплюючи від них окремі молекули цукру.

Альфа-амілаза розщеплює внутрішні ланцюги, утворюючи клеєподібну речовину, так званий декстрин.

Ці ферменти відіграють винятково велику роль при випіканні хліба. Якщо просто змішати борошно з водою і пекти хліб, то дістанемо тверді несмачні коржики, які можна їсти тільки в гарячому вигляді. Коли ж вони остигнуть, то стають «кам'яними».

Людство не відразу прийшло до виготовлення смачного хліба, який ми вживаємо щодня. Тільки в середні віки при виготовленні хліба почали вживати дріжджі.

Яку ж роль відіграють тут дріжджі?

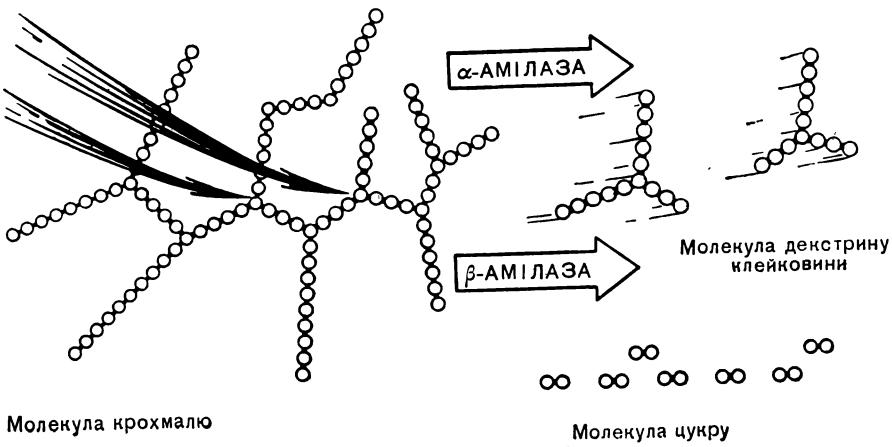
Розглянемо трохи докладніше хімію хлібопечення.

Якщо до суміші борошна з водою, яка утворює тісто, додати дріжджів, то тісто починає, як кажуть, «підходити». Фермент амілаза починає діяти на цукристі речовини борошна, в результаті чого вони розкладаються з утворенням спирту і двоокису вуглецю. Цей процес проходить при температурі 35—40°. Тому при готуванні тіста його ставлять звичайно у тепле місце. Бульбашки вуглекислого газу розрихлюють тісто.

Щоб тісто, як кажуть, «піднялося», стало пухким, цукру, що міститься у борошні, не досить. І ось тут і вступає в дію амілаза. Бета-амілаза розщеплює крохмаль борошна до цукру, і він зброджується дріжджами. Якщо у борошні бета-амілази мало, то тісто не досить розпушується і хліб виходить мало пористий і несмачний. Вже давно було помічено, що борошно із зерен пшениці, застигнутих на полі ранніми морозами, має низьку якість і хліб, який випікається з такого борошна, несмачний.

У чому ж справа?

Виявилось, що в таких зернах поряд з бета-амілазою міститься багато альфа-амілази, яка



«І все це робиться з мовою допомогою».

доводить розщеплення до декстрину, клеєподібної речовини.

Активність альфа-амілази можна знизити, якщо тісто підкислити. Тому при випіканні хліба вживають закваску, що містить бактерії, які переробляють цукор у молочну кислоту. Отже, не можна випекти добрий хліб без застосування органічних каталізаторів, ферментів. Недарма К. А. Тімірязєв сказав, що скибка добре випеченого хліба становить один з найбільших винаходів людського розуму.

ЖИВЕ ЧИ НЕЖИВЕ

Ферменти у практиці віддавна вживались у вигляді дріжджів. Дріжджі — живі одноклітинні організми. Тому виникла теорія про «організовані ферменти», що мають особливу «життєву силу».

Теорія про непізнаванну «життєву силу» ферментів була спростована російським ученим В. О. Манассеїним.

Було відомо, що дріжджові клітини, основою яких є білок, руйнуються при температурі понад 60°.

Манассеїн нагрів розчин, що містить дріжджі, вище 60°. Дріжджові клітини були вбиті. Незважаючи на це, розчин, як раніше, спричиняв бродіння цукру. Він убивав дріжджові клітини саліциловою кислотою. Але дія ферментів знов-таки не припинялась. Цими простими дослідами і було доведено, що ферменти діють точно так само, як і неорганічні каталізатори.

Порівнюючи з неорганічними каталізаторами, ферменти більш активні, і їх дія залежить від температури і кислотності середовища.

Ферменти звичайно діють при температурі 40—50°. При нижчій температурі активність їх слабшає. При високій температурі ферменти, як і всі білкові речовини, зсідаються (денатуруються) і втрачають активність.

Вибірність дії ферментів видно і в тому, що їх активність виявляється при певному значенні кислотності. Так, наприклад, пепсин, який міститься у шлунковому соку, активний тільки у сильно кислому середовищі, а трипсин — в лужному середовищі.

Ферментативні процеси лежать у основі виробництва чаю, тютюну, спирту. Ферменти регулюють найважливіші процеси, що відбуваються у тісті при випіканні хліба. Ферменти відіграють роль при дозріванні сиру, виготовленні вин.

В основі дії ферментів лежить той самий механізм, що й при дії каталізаторів. Складні молекули ферментів сполучаються з молекулами тієї речовини, на яку фермент діє, утворюючи проміжні продукти. Потім відбувається розпад проміжних сполук, і ферменти знову відновлюються.

БЕЗПОЛУМ'ЯНЕ ГОРІННЯ

Ще Д. І. Менделєєв вказував на можливість спалювання водню без полум'я, якщо пропускати його крізь тонко подрібнену платину.

Каталітичне безполум'яне горіння газу вигідне тим, що при цьому відбувається повне згоряння (окислення) палива і димові гази не містять сажі і окису вуглецю. На рисунку показано найпростішу піч для безполум'яного

горіння газу. Безполум'яне горіння дозволяє відмовитись від громіздких печей-топок і дає змогу будувати безтопочні котли, в яких паливо згорятиме на поверхні самого котла...

Каталізатори широко застосовують у найрізноманітніших галузях промисловості. Так, наприклад, з допомогою каталізаторів рідкі масла перетворюють у тверді, з нафти добувають найрізноманітніші продукти, потрібні для дальшого промислового використання. Останнього часу з допомогою каталізаторів з природного газу, а також з продуктів переробки нафти синтезують багато різних пластмас. Зокрема, добуто пластмаси, з яких роблять волокна, що є матеріалом для виготовлення як побутових, так і технічних тканин. На основі застосування каталізаторів добувають штучний каучук. Та й взагалі важко тепер уявити собі, як можна обійтись без застосування каталітичних реакцій і каталізаторів.

ЩО ВИРАЖАЮТЬ ХІМІЧНІ РІВНЯННЯ

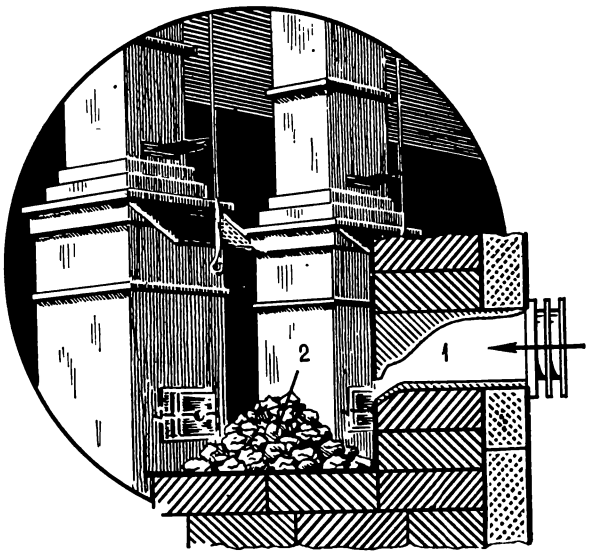
Чи горить водень в атмосфері хлору чи хлор в атмосфері водню, або ж вибухає з оглушливим гуркотом суміш цих газів, коли проскакує крізь неї електрична іскра або коли вона раптово освітлюється яскравим світлом,— відбувається та сама реакція, яку ми виражаємо рівнянням:

$$H_2 + Cl_2 = 2HCl. \qquad (7)$$

Коли ми дивимось на це рівняння, ми в думках уявляємо, як молекула хлору і молекула водню, зіткнувшись, обмінюються атомами з утворенням двох молекул хлористого водню.

Але ось які факти. Якби ми мали у десять мільйонів раз гостріший зір, суміш водню з хлором ми побачили б як стовпище молекул, що безладно рухаються в усіх напрямах. Молекули неперервно стикаються і відскакують одна від одної, як два футбольних м'ячі, що зустрілись у повітрі. За якусь частку секунди кожна воднева молекула суміші встигне (і не один раз!) зіткнутися то з тією, то з іншою молекулою хлору. Але наша суміш газів на холоді і в темряві може зберігатися місяці і роки, і жодних видимих ознак хімічної реакції ми не помітимо.

Точно так само, якщо через необережність залишити відкритим кран газової плити, молекули горючого газу метану CH_4 проникнуть у повітря, зустрінуться з молекулами кисню,



Піч для безполум'яного каталітичного горіння. 1 — пальник, крізь який надходить газ; 2 — вогнетривкий матеріал, що є каталізатором.

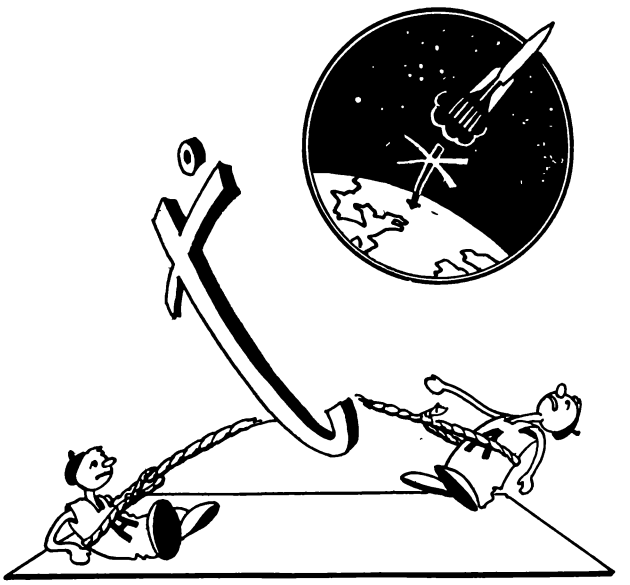
але суміш не спалахне. Якщо в кімнаті, наповненій сумішшю метану з повітрям, запалити сірник, станеться страшенний вибух. Вибух суміші метану з повітрям, як і горіння метану, виражається рівнянням:

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O. \qquad (8)$$

Після того як ми познайомились з каталітичними реакціями, нікого вже не здивує, що хімічні реакції, крім рідких винятків, не виражають справжнього механізму хімічних реакцій. У рівняннях вказують лише початкові і кінцеві продукти хімічної реакції, але не говорять про те, через які проміжні сполуки початкові продукти перетворюються в кінцеві.

Так, при окисленні метану CH_4 його молекула не зразу перетворюється в молекулу вуглекислого газу CO_2. Перед тим вона перетворюється у молекули формальдегіду COH_2, гідроперекису метилу H_3COOH, метилового спирту CH_3OH і т. д. Ці проміжні речовини звичайно бувають менш стійкими, ніж вихідні речовини, і швидко перетворюються в кінцевий продукт. Виникає питання, чому ж реакція вибирає такий складний шлях, якщо на перший погляд вона могла б проходити далеко простіше? Навіщо вихідним речовинам утворювати спочатку якісь проміжні продукти, а не відразу кінцеві?

З тієї ж причини, з якої ріка ніколи не тече прямолінійно.



Теплота, подібно до невидимого меча, може руйнувати молекули.

У своїй течії ріка зустрічає різні перепони і немовби шукає шлях, яким їй найлегше текти. Якщо ж на її шляху зустрінеться гора, ріка її огинає. Що ж це за «гора», яку хімічна реакція не може подолати, через яку вона змушена шукати обхідні шляхи?

Такою перепоною для кожної реакції є та сама енергія активації.

Молекули речовин складаються з атомів, які зв'язані між собою хімічними зв'язками. Хімічна реакція в тому і полягає, що ряд зв'язків у вихідних молекулах розривається; атоми перерозподіляються, утворюючи нові зв'язки. А для того щоб розірвати хімічний зв'язок у молекулі, потрібно затратити певну енергію, подібно до того, як, наприклад, потрібно затратити певну енергію на те, щоб ракета подолала силу земного тяжіння і, відірвавшись від Землі, полетіла в світовий простір. Ракета дістає цю енергію коштом роботи своїх двигунів. А звідки добувають потрібну енергію молекули реагуючих речовин?

У різних реакціях по-різному. В термічних реакціях джерелом цієї енергії є тепло, що надається реагуючою речовиною. При нагріванні молекули речовини починають рухатись дедалі швидше. Отже, зростає їх кінетична енергія. Коли ця енергія перевищить енергію активації, почнеться хімічна реакція.

Енергія, потрібна для реакції, може доставлятись у вигляді світлової енергії. Найбільш ефективне щодо цього ультрафіолетове проміння. Енергія ультрафіолетового проміння достатня, щоб розірвати хімічні зв'язки в молекулах найрізноманітніших речовин. Хімічні реакції, що проходять під дією світла, називаються фотохімічними.

Останнього часу інтенсивно розвивається порівняно молода наука — радіаційна хімія, яка вивчає хімічні процеси, що йдуть при опромінюванні речовин швидкими електронами, нейтронами і γ-промінням — продуктами розпаду радіоактивних речовин. При роботі атомних реакторів велика кількість енергії виділяється у вигляді таких частинок. Проблема використання цієї енергії для хімічних реакцій дуже цікава.

Розглянемо фотохімічну реакцію між воднем і хлором.

$$H_2 + Cl_2 + \text{квант світла} \rightarrow 2HCl. \qquad (9)$$

Квант світла (про те, що таке квант світла, див. у статті «Світло і його застосування» цього ж тома ДЕ), поглинаючись молекулою, руйнує її. Один квант світла може зруйнувати тільки одну молекулу. Опромінюючи суміш водню з хлором ультрафіолетовим промінням, вчені могли чекати, що число утворених молекул HCl відповідатиме числу ввібраних квантів. Виявилося ж, що число утворених молекул HCl у сотні тисяч раз більше числа ввібраних квантів, тобто в результаті руйнування світлом молекули Cl_2 утворюються не дві (як слід було б чекати за рівнянням реакції), а сотні тисяч молекул HCl.

Що означає вираз, що під дією світла молекула Cl_2 зруйнувалась? Молекула хлору складається з двох атомів, зв'язаних хімічним зв'язком, який у структурних хімічних формулах позначають рисочкою:

$$Cl - Cl \xrightarrow[\text{квант світла}]{} Cl^{\cdot}\,Cl^{\cdot} \qquad (10)$$

Вбираючись молекулою Cl_2, квант світла розриває зв'язок між атомами, атоми хлору звільняються і розлітаються в різні сторони. На відміну від атомів, зв'язаних у молекулах, такі атоми називаються вільними.

Кожний хімічний зв'язок між атомами в молекулі створюється двома електронами, по одному електрону від кожного атома. Не всі електрони в атомі беруть участь в утворенні хімічного зв'язку, а тільки деяка, цілком певна для кожного атома кількість. В атомі хлору звичайно так виявляє себе усього один елек-

трон, в атомі кисню — завжди два, в атомі вуглецю — чотири і т. д. Електрони в атомі, здатні утворювати хімічні зв'язки, називаються валентними електронами, а кількість їх в атомі визначає валентність атома.

Під валентністю атома розуміють ту кількість хімічних зв'язків, яку він утворює з іншими атомами. Отже, хлор звичайно одновалентний, кисень — двовалентний, а валентність атома вуглецю дорівнює чотирьом.

Згадаємо ще про водень. В атомі водню усього тільки один електрон. Цей електрон дозволяє атому водню утворювати лише один зв'язок з атомом будь-якого іншого елементу. Отже, водень одновалентний.

Якщо валентні електрони умовитись позначати точками поряд з хімічним символом елементу, то атоми водню, хлору, кисню і вуглецю можна зобразити таким чином: $H^{\cdot}$, $\dot{Cl}$, $\cdot\dot{O}\cdot$, $\cdot\dot{C}\cdot$.

Спробуємо тепер побудувати з цих атомів різні молекули:

$$H^{\cdot} + H^{\cdot} \rightarrow H - H \text{ (водень)}$$
$$Cl^{\cdot} + Cl^{\cdot} \rightarrow Cl - Cl \text{ (хлор)}$$
$$Cl^{\cdot} + H^{\cdot} \rightarrow H - Cl \text{ (хлористий водень)}$$

$$2H^{\cdot} + \cdot\dot{O}\cdot \rightarrow H\diagup\!\diagdown O \text{ (вода)}$$

$$4H^{\cdot} + \cdot\dot{C}\cdot \rightarrow H-\underset{H}{\overset{H}{\underset{|}{\overset{|}{C}}}}-H \text{ (метан)} \qquad (11)$$

Зображені цими формулами речовини існують і добре відомі. Чим же вільні атоми відрізняються від молекул?

Очевидно, тим, що у вільних атомах є валентні електрони, не зайняті у хімічних зв'язках і готові в будь-який момент такі зв'язки утворити. Цілком очевидно, що вільні атоми повинні легше вступати в хімічні реакції, ніж молекули. Адже в молекулах потрібно ще розслаблювати або навіть розривати зв'язки між атомами, а в реакціях між атомами в цьому немає потреби. Тому можна чекати, що енергії активації реакцій атомів будуть менші, ніж енергії активації реакції молекул.

Все те, що ми дізнались про вільні атоми, дозволяє зрозуміти, як проходить фотохімічна реакція водню з хлором. Під дією кванта світла молекула Cl_2 розпадеться на атоми:

$$Cl_2 + \text{квант світла} \rightarrow 2Cl^{\cdot}. \qquad (12)$$

Оскільки в реакційній посудині, крім молекул Cl_2, є ще молекули H_2, атоми Cl реагуватимуть з ними, утворюючи молекулу HCl і атом $H^{\cdot}$:

$$Cl^{\cdot} + H_2 \rightarrow HCl + H^{\cdot}. \qquad (13)$$

Вільний атом $H^{\cdot}$ в свою чергу атакує молекулу Cl_2:

$$H^{\cdot} + Cl_2 \rightarrow HCl + Cl^{\cdot}. \qquad (14)$$

В результаті утворюється нова молекула хлористого водню і атом $Cl^{\cdot}$, який знову може реагувати з молекулою H_2, і т. д. Чергування реакцій (13) і (14) утворює все нові і нові молекули хлористого водню. Атоми хлору і водню при цьому не зникають з реагуючої суміші, тому що вони увесь час відновлюються. Реакції (13) і (14) чергуються, як ланки в ланцюгу, тому реакції такого типу названі були ланцюговими. Отже, стає зрозумілим, чому в результаті розпаду на атоми однієї молекули Cl_2 може утворюватись безліч молекул HCl.

На перший погляд може здатись, що в ланцюгових реакціях досить з'явитись одному атому, щоб реакція дійшла до кінця, тобто доти, доки не витратиться хоч би одна з реагуючих речовин. В дійсності це не так. Поряд з реакціями (13) і (14) можуть відбуватись і реакції між атомами $Cl^{\cdot}$ і $Cl^{\cdot}$, $Cl^{\cdot}$ і $H^{\cdot}$ або $H^{\cdot}$ і $H^{\cdot}$:

$$\begin{aligned} H^{\cdot} + H^{\cdot} &= H - H \\ Cl^{\cdot} + Cl^{\cdot} &= Cl - Cl \\ H^{\cdot} + Cl^{\cdot} &= H - Cl. \end{aligned} \qquad (15)$$

Видно, що в цих реакціях атоми «гинуть», тобто зникають, а інші атоми замість них не з'являються. Але ж із «загибеллю» одного атома обривається цілий ланцюжок хімічних перетворень. Тому такі реакції названі були реакціями обриву ланцюга.

Отже, вчені пояснили поведінку реакції $H_2 + Cl_2$, припустивши, що «провідну» роль у цій реакції відіграють вільні атоми хлору і водню. Залишилось довести, що такі атоми справді існують. Цілий ряд спеціально поставлених дослідів показав, що у фотохімічній реакції водню з хлором справді є вільні атоми водню і атоми хлору. Досліди показали також, що, на відміну від молекул, атоми не можуть довго існувати у вільному стані внаслідок своєї здатності легко вступати в різні реакції. «Час життя» атома, тобто час, який він перебуває у вільному стані, обчислюється сотими і тисячними частками секунди.

Уявлення про «ланцюги» виявилось дуже плодотворним у застосуванні і до інших фото-

хімічних реакцій. Так, наприклад, ці уявлення цілком застосовні до фотохімічного хлорування вуглеводнів. Розглянемо його на прикладі метану. Будемо опромінювати суміш хлору з метаном. Відомо, що на метан світло не діє, а молекули хлору під дією світла розпадаються на атоми.

За аналогією з реакцією синтезу хлористого водню припустимо, що атоми $Cl^{\cdot}$, реагуючи з молекулою метану, відривають від неї атоми $H^{\cdot}$, утворюючи молекулу HCl і осколок молекули метану $CH^{\cdot}_3$:

$$Cl^{\cdot} + CH_4 \rightarrow HCl + CH^{\cdot}_3. \qquad (16)$$

Такі осколки молекул дістали назву в і л ь н и х р а д и к а л і в. Неважко помітити, що в радикала CH_3 є дуже істотна схожість з вільним атомом, а саме: він має незв'язаний електрон. Тому радикал $CH^{\cdot}_3$, подібно до атома $H^{\cdot}$, легко реагуватиме з молекулою Cl_2, утворюючи хлористий метил CH_3Cl і відроджуючи атом $Cl^{\cdot}$:

$$\begin{aligned} Cl^{\cdot} + CH_4 &\rightarrow HCl + CH_3. \\ CH^{\cdot}_3 + Cl_2 &\rightarrow CH_3Cl + Cl^{\cdot}. \end{aligned} \qquad (17)$$

При зіткненні атомів і радикалів ланцюги обриваються.

На прикладі реакцій окислення вчені зустрінулись з новими явищами. Було встановлено, що реакція окислення водню при низьких температурах і тисках практично не відбувається, але варто тільки трохи підвищити тиск, і суміш водню з киснем реагує з вибухом. Якщо і далі досить сильно підвищувати тиск, суміш водню з киснем однаково буде вибухати, доки, нарешті, дуже невелика зміна тиску не спричиниться до того, що реакція припиниться.

Ці факти привели до створення т е о р і ї р о з г а л у ж е н и х л а н ц ю г о в и х р е а к ц і й. Суть її полягає в тому, що в результаті реакції радикала чи атома з молекулою може утворитись не один, а більше число радикалів. Відбувається немовби розмноження радикалів у процесі реакції. Внаслідок цього зростає концентрація радикалів, отже, і швидкість реакції.

За аналогією з реакцією синтезу хлористого водню реакція сполучення водню з киснем повинна починатись із зародження радикалів, наприклад з реакції:

$$H_2 + O_2 \rightarrow H^{\cdot} + HO^{\cdot}_2. \qquad (18)$$

Потім атоми $H^{\cdot}$, реагуючи з киснем, утворюють $OH^{\cdot}$ і $\cdot O \cdot$.

$$H^{\cdot} + O_2 \rightarrow H\dot{O} + \cdot O \cdot . \qquad (19)$$

На перший погляд ця реакція дуже схожа на реакцію (14):

$$H^{\cdot} + Cl_2 \rightarrow HCl + Cl^{\cdot}.$$

Але між ними, проте, є принципова різниця.

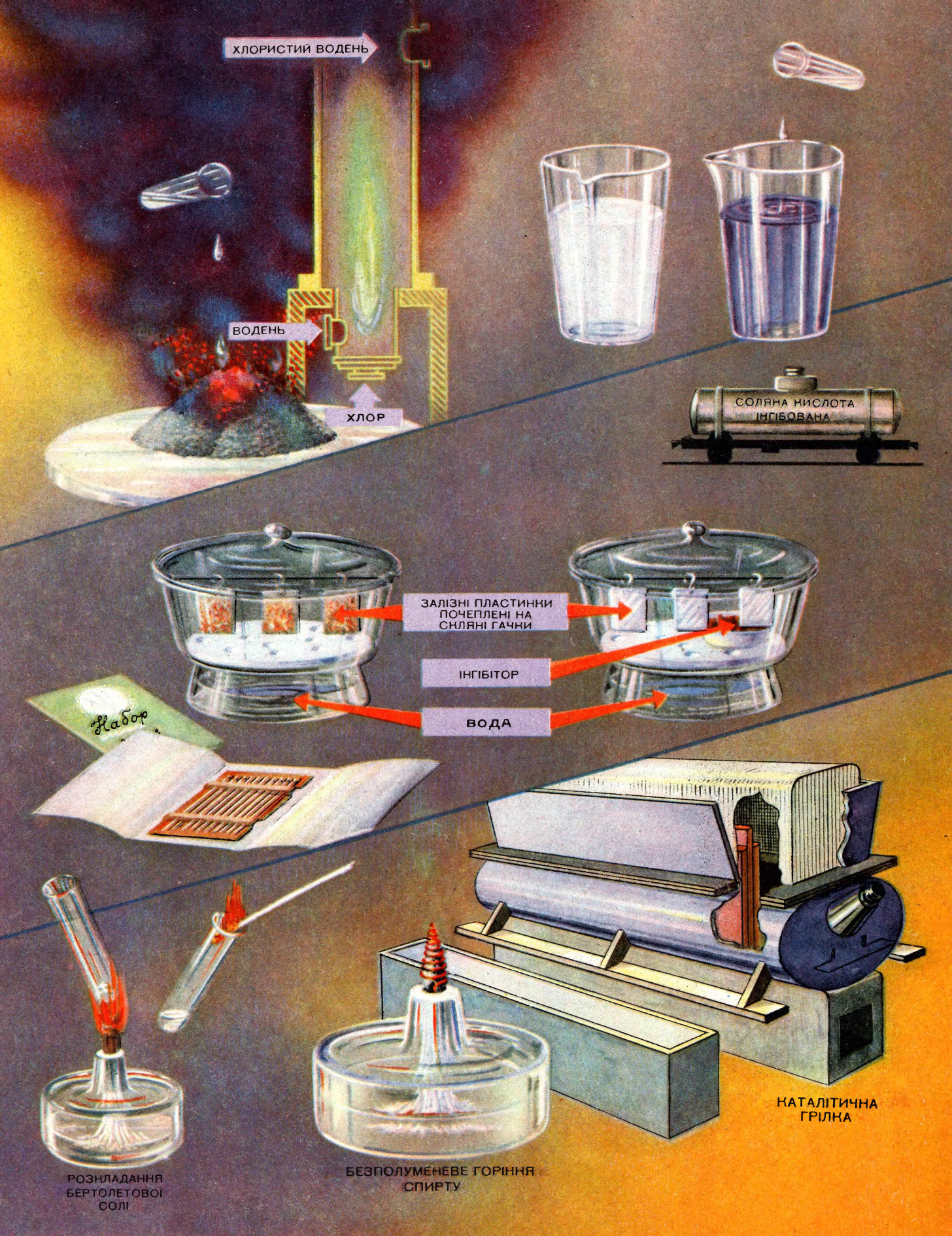
В результаті реакції (14) утворюється усього один незв'язаний електрон. Скільки їх утворюється в реакції (19)? Підрахуємо. Ми знаємо, що атом $\cdot O \cdot$ має два незв'язаних електрони, а радикал $HO \cdot$ — один. Отже, в реакції (19) утворюються цілих три незв'язаних електрони! Атом $\cdot O \cdot$ і радикал $OH^{\cdot}$ швидко вступають в реакцію з молекулами водню і знову утворюють радикал $OH^{\cdot}$ і два атоми $H^{\cdot}$:

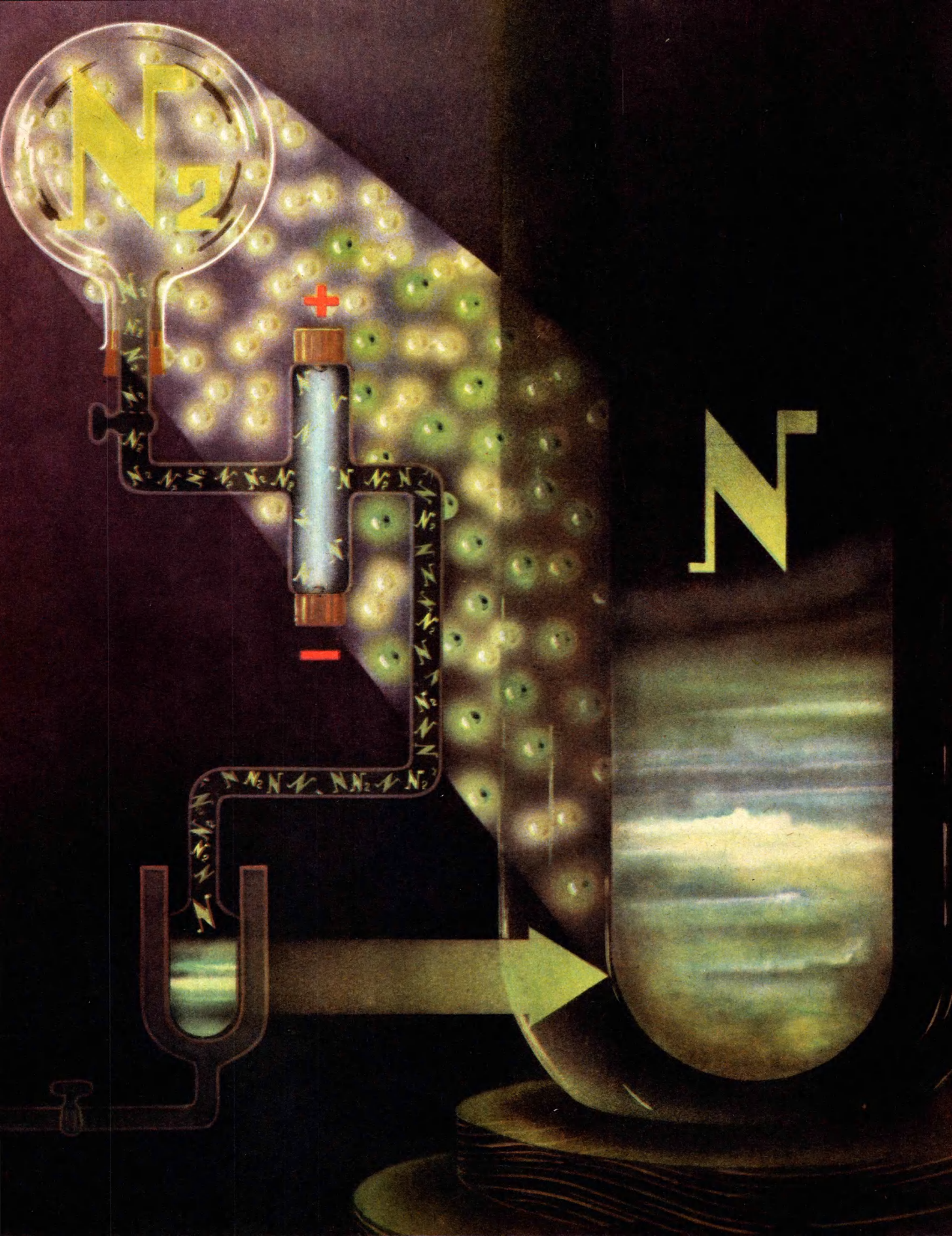
$$\begin{aligned} OH^{\cdot} + H_2 &\rightarrow H_2O + H^{\cdot} \\ \cdot O \cdot + H_2 &\rightarrow OH^{\cdot} + H^{\cdot}. \end{aligned} \qquad (20)$$

Так відбувається розмноження радикалів у розгалужених ланцюгових реакціях. Досить реакції розпочатись (наприклад, при проскоку крізь суміш електричної іскри), як відбудеться лавиноподібне наростання кількості радикалів і атомів, отже, і швидкості реакції. Але атоми і радикали не тільки народжуються, але й гинуть. Вони гинуть на стінках посудини, гинуть при зустрічі один з одним. Якщо за одиницю часу виникає атомів і радикалів більше, ніж гине, відбувається вибух; якщо, навпаки, реакція затухає, вибуху не відбувається.

При низькому тиску радикали настільки інтенсивно гинуть на стінках посудини, що ланцюгова лавина не може розвинутись. Із збільшенням тиску загибель радикалів на стінках відносно зменшується, і, нарешті, при

Таблиця 43. Якщо до порошкоподібної суміші алюмінію і йоду прилити кілька крапель води, ця суміш бурхливо взаємодіятиме з виділенням йодистого алюмінію, який утворює темно-фіолетову хмару пари йоду (зображено у верхній частині рисунка). Поряд — колонка синтезу хлористого водню із вільних хлору і водню, а вгорі справа — дослід, що показує роль молібдену в прискоренні реакції між йодистоводневою кислотою і перекисом водню. У середній частині рисунка зображені набір швацьких голок, упакованих в інгібований папір (рисунок крайній зліва), лабораторні досліди (в ексикаторах) по вивченню захисної дії інгібіторів проти іржавіння сталі (рисунок посередині) і залізну цистерну з соляною кислотою, до якої додано невелику кількість інгібітора. Внизу показані каталітична грілка і досліди з безполум'яним горінням спирту і розкладом бертолетової солі.


ХЛОРИСТИЙ ВОДЕНЬ
ВОДЕНЬ
ХЛОР
СОЛЯНА КИСЛОТА
ІНГІБОВАНА
ЗАЛІЗНІ ПЛАСТИНКИ
ПОЧЕПЛЕНІ НА
СКЛЯНІ ГАЧКИ
ІНГІБІТОР
ВОДА
Набор
РОЗКЛАДАННЯ
БЕРТОЛЕТОВОЇ
СОЛІ
БЕЗПОЛУМЕНЕВЕ ГОРІННЯ
СПИРТУ
КАТАЛІТИЧНА
ГРІЛКА


N_2
+
−
N

тиску трохи вище критичного настає такий момент, коли реакції, що спричиняють загибель радикалів, вже не зможуть справлятися з радикалами, які утворюються в реакціях розгалуження ланцюгів. Концентрація радикалів починає швидко наростати. Відбувається вибух.

Продовжуючи збільшувати тиск, ми знову можемо вийти з ділянки займання в ділянку повільної реакції. Що ж у цій ділянці заважає розвиватись ланцюговій лавині? Виявляється, знову реакції загибелі радикалів. Але тільки тепер радикали гинуть вже в усьому обсязі, а не тільки на стінках посудини.

Уявлення про можливість загибелі і зародження радикалів на стінках посудини пояснило надзвичайну чутливість усіх подібних реакцій до стану стінок посудини. Справді, з кожним радикалом, що гине, гине цілий ланцюг хімічних перетворень. Якщо гине тільки один радикал, в реакції не утворюються сотні і тисячі молекул продуктів. Тому невелике збільшення загибелі радикалів коштом стану стінок посудини може різко змінити швидкість реакції. І, навпаки, обробка стінок посудини речовинами, здатними полегшувати зародження радикалів, збільшує швидкість реакції.

Радикали можуть гинути не тільки при зіткненнях між собою або із стінкою посудини, вони можуть гинути і в результаті реакції з деякими сторонніми речовинами. Це і є інгібітори, про які говорилося на стор. 630. Найсильнішим інгібітором для реакції сполучення водню з хлором є кисень. Мізерно малі добавки кисню значно зменшують швидкість цієї реакції. З другого боку, ланцюгову реакцію можна прискорити добавками речовин, які легше, ніж сама реагуюча речовина, здатні розпадатись на радикали. Такі речовини дістали назву ініціаторів, а використання цих речовин для прискорення реакцій називається ініціюванням.

Ланцюгові розгалужені реакції були відкриті, і їх основні закономірності сформульовані в роботах радянських учених. За багаторічні плодотворні дослідження в галузі ланцюгових хімічних реакцій акад. М. М. Семенов був удостоєний в 1956 р. Нобелівської премії.

Відкриття великого числа хімічних реакцій, які проходять з участю атомів і радикалів, спричинилось до вивчення будови і властивостей цих надзвичайно активних в хімічному відношенні сполук.

Дуже важливим, наприклад, було доведення існування метильного радикала $CH_3^{\cdot}$. Цей радикал дуже активний. Він може існувати у вільному стані тільки тисячні частки секунди. Слідом за метильним радикалом було доведено існування і інших вуглеводневих радикалів: етильного $C_2H_5^{\cdot}$ і метиленового $CH_2^{\cdot}$.

У пробірках, занурених в рідкий азот чи гелій, як у холодильниках, можна зберігати вільні атоми і радикали.

Застосування фізичних методів, таких, як спектроскопічний і мас-спектрометричний, ознаменувалось новими успіхами в цій галузі. Спектроскопічно були виявлені радикали OH, SO, PO, CN, CH, NH, HCO і ряд інших дво- і триатомних радикалів. Застосування масспектрометричної техніки дозволило виявити різні складні радикали у реакціях термічного розпаду та інших реакціях.

Останнього часу широко почали застосовувати метод «заморожування» радикалів, який полягає в тому, що радикали і атоми з місця, де вони утворюються, швидко витягаються в уловлювачі, які охолоджуються рідким азотом чи рідким гелієм. Температура рідкого азоту дуже низька: — 196°С. Температура рідкого гелію ще нижча: —268,9°С; вона тільки на 4° вища від абсолютного нуля. При цих температурах переважна більшість хімічних процесів проходити не може. Зрозуміло, радикали витягаються з реакції не самі, а разом з молекулами, які не встигли розпастись на атоми, і заморожуються вони також разом з цими молекулами. В такому стані багато радикалів вдається зберігати довгий час і вивчати різними способами. Таким чином, радикали, що фігурують у ланцюгових схемах, є реально існуючими частинками.

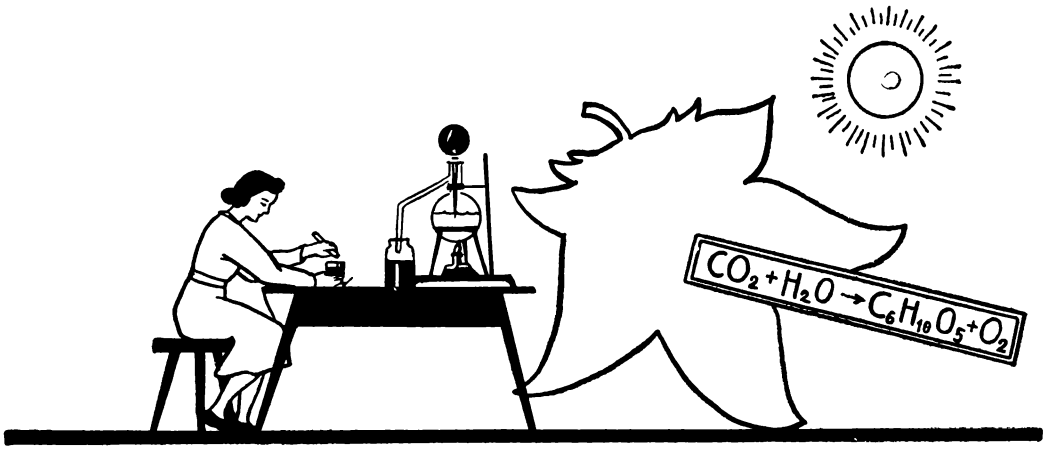
Залежність протікання ланцюгових реакцій від багатьох факторів дає в руки вчених мож-

Таблиця 44. Схема перетворення молекулярного азоту в атомарний під впливом електричного розряду. Справа показано «заморожений радикал» — рідкий атомарний азот.

ливість свідомо керувати хімічними процесами. Важко керувати реакцією, на яку ніщо не впливає. Легше керувати реакцією, на яку впливає багато факторів. Важливо тільки з'ясувати детальний механізм цього впливу, усунути шкідливі і посилити корисні впливи, і таким чином примусити реакцію проходити так, як це нам потрібно.

У сучасний період побудови комуністичного суспільства планування науки стало таким самим державним завданням, як і планування народного господарства. Рішення позачергового XXI з'їзду КПРС передбачають концентрацію наукових сил і засобів на найбільш важливих напрямах дослідження, що мають особливий теоретичний і народногосподарський інтерес. Для хімії це — проблема керування хіміко-технологічними процесами (каталіз, ланцюгові реакції) і проблема створення синтетичних матеріалів із заданими властивостями, що задовольняють потреби сучасної техніки.

Завдання свідомого керування хімічним процесом є основним завданням, яке стоїть перед тими, хто вивчає механізм хімічних реакцій. Завдання це грандіозне. Багато вже зроблено на шляху до його розв'язання, але незрівнянно більше ще залишилося зробити. Бурхливий розвиток хімії полімерів та інших галузей хімічної промисловості стимулює нові дослідження в галузі механізмів хімічних перетворень. Поряд з теоретично цікавими дедалі більша кількість практично важливих реакцій стає предметом пильного дослідження. І не може бути сумніву в тому, що на цьому шляху здобуті будуть нові чудові успіхи.



Хімія змагається з природою

ОРГАНІЧНІ РЕЧОВИНИ НАВКОЛО НАС

Чому виноград і цукрові буряки солодкі, а лимон і щавель кислі? При випарюванні соку цукрових буряків добувають маленькі пластинчасті кристали — цукор. Він саме і надає стиглим бурякам солодкого смаку. При випарюванні соку очищеного лимона або щавлю дістають безбарвні кристали лимонної або щавлевої кислоти. Ці речовини і надають кислого смаку лимону і щавлю. Вони, як і цукор, утворились у рослинах.

В організмах тварин і комах теж утворюється і нагромаджується багато різних речовин. Так, наприклад, в організмі мурашки міститься мурашина кислота. Захищаючись від вторгнення ворогів в їх житло—мурашину купу,— мурашки випорскують цю їдку рідину з черевця. Бджола будує щільники з воску, в який перетворюються в її організмі солодкі соки рослин (рис. 1). В організмах тварин і людини виробляються жири, білки і безліч інших речовин.

Жодної з перелічених нами речовин ми не знайдемо у неживій природі. Тому і назвали їх свого часу органічними речовинами; а ту частину хімії, завданням якої є дослідження складу і властивостей, відшукання способів добування і переробки таких речовин,— органічною хімією.

Кусок цукру, м'яса або хліба, як і вся наша їжа, складається з органічних речовин. З них також складається наш одяг і паливо.

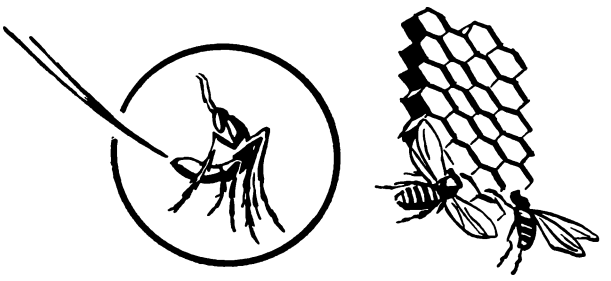


Рис. 1.

ЯК РОЗПІЗНАЮТЬ ОРГАНІЧНІ РЕЧОВИНИ

Неуважним людям трапляється класти у чай сіль, а цукром «солити» суп. Адже цукор часто схожий зовнішнім виглядом на сіль. Але ніхто не сплутає їх за смаком. Легко відрізнити цукор від солі і не торкаючись до них язиком.

Якщо на розжарену плиту просипати сіль, з нею нічого не станеться; якщо ж просипати цукор, він спочатку розплавиться, потім почне чорніти і, нарешті, перетвориться у вугілля, а кімната наповниться чадом. Те саме відбувається з багатьма іншими органічними речовинами. Якщо ви, поставивши смажитись картоплю або м'ясо, зазіваєтесь, то замість них знайдете на сковорідці куски вугілля. А втім, далеко не всі органічні речовини при нагріванні обвуглюються.

Інша, далеко більш поширена особливість органічних речовин — горючість. Кожний вміє запалити дерево. Але спробуйте запалити кусочок цукру. Він буде плавитись, пузиритись, шипіти, чорніти, але не займеться. Тут потрібно знати «секрет»! Посипте на цукор трошечки попелу з пічки або з попільниці і піднесіть до нього запалений сірник — він спалахне синім шумливим полум'ям і згорить увесь (рис. 2). Попіл сам не горить, але тут він служить «підсобником», або, як кажуть хіміки, каталізатором, для реакції горіння цукру.

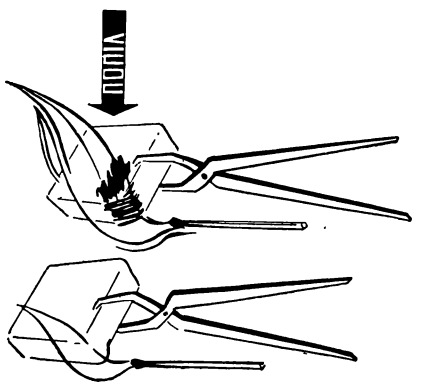


Рис. 2.

Отже, цукор може служити паливом? Траплялось, що ним і справді топили печі.

Врожайний для цукрових буряків рік стає для американських фермерів справжнім лихом. Ринок завалюють цукром, ціни на нього катастрофічно падають, фермерам загрожує розорення. І щоб підтримати ціни, лишки цукру посилають у топки печей.

Горючі майже всі органічні речовини. Багато з них служать нам паливом — джерелом тепла і світла. В будинках і на заводах ми використовуємо як паливо тільки найдешевші з горючих органічних речовин: деревину, гас, кам'яне вугілля.

З ЧОГО СКЛАДАЮТЬСЯ ОРГАНІЧНІ РЕЧОВИНИ

Як і всі інші, органічні речовини складаються, звичайно, з атомів. Але з яких саме?

До складу усякої органічної речовини обов'язково входить вуглець. Ось чому багато з них при нагріванні підгоряють, обвуглюються. Це атоми вуглецю, які раніше були сполучені з атомами інших елементів, звільнились і зчепились один з одним — утворились кусочки вугілля. Коли ж органічна речовина не пригоряє, а згоряє, від неї не залишається навіть вугілля. Адже атоми вуглецю зв'язуються з атомами кисню і випаровуються в повітря у складі невидимих молекул вуглекислого газу.

У цьому дуже просто переконатись. Потримайте над полум'ям сірника, стеаринової свічки або керосинки перевернуту склянку, стінки якої були перед тим змочені розчином гашеного вапна. Краплі його замутяться від розчиненого в ньому вуглекислого газу. Неважко переконатись також, що до складу органічних ре-

Рис. 3.

човин входять атоми водню. Щоб «піймати» їх, потрібно знов-таки перевернути склянку, але на цей раз суху, і піднести під неї запалений сірник, а коли він згорить — другий, потім третій, четвертий, п'ятий (рис. 3). Вже від першого сірника суха склянка всередині злегка запітніє, як холодне скло, коли на нього подихати. Потім крапельки на її стінках дедалі збільшуватимуться, і, нарешті, із склянки закапає звичайна вода. Кисень на її утворення надходить з атмосфери, а водню нізвідки було взятися, як тільки із дерева, що згоряє. Ось ми і довели, що до складу деревини входить, крім вуглецю, і водень.

Те саме буде, якщо під склянкою спалювати замість дерева цукор, крупу та інші органічні речовини. Якщо уявити собі мандрівників, що загубились у безводній пустелі, які мають, проте, в достатку паливо, то, теоретично кажучи, їм не загрожує загибель від спраги.

Вуглець і водень входять до складу кожної органічної речовини. Бензин, гас, каучук складаються тільки з атомів вуглецю і водню. До складу деревини, крохмалю, цукру, рослинних і тваринних жирів входять також атоми кисню, до складу білків — атоми азоту і сірки.

Ось чому при гнитті курячого яйця виділяється зловонний сірководень.

ПРИРОДНІ «ФАБРИКИ» ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

Повернемось тепер до «фабрик», в яких виробляються органічі речовини в природі,— до рослин і тварин. Рослини добувають вуглець із невидимих молекул вуглекислого газу, які завжди носяться в повітрі, а кисень і водень — з води, яка вбирається їх корінням з грунту. Потім з допомогою сонячного світла вони утворюють з води і вуглекислого газу молекули цукру, крохмалю, рослинної олії, кислот та інших речовин.

Тварини, живлячись рослинною їжею, «переробляють» її в молекули нових органічних речовин.

Навіть кам'яне вугілля і нафта, які ми добуваємо з надр землі,— не що інше, як залишки рослин і тварин, що населювали Землю мільйони років тому. Без рослин і тварин, без органічних речовин, які доставляються ними, ми загинули б від голоду і холоду.

ВЕЛИКЕ ЗМАГАННЯ ВЧЕНИХ З ПРИРОДОЮ

Ми переконались у тому, як легко знищити, зруйнувати органічну речовину, перетворивши її на вугілля чи вуглекислий газ і воду. А чи можна знову добути зруйновану органічну речовину штучно, з того самого вугілля і тієї самої води? Тоді не потрібно було б вирощувати на полях бавовник, жито, кукурудзу, цукрові буряки, рослини, в яких виробляється каучук. Продукти живлення, матеріал для одягу, каучук для калош і автомобільних шин — усе це можна було б виробляти на заводах.

Довгий час хімікам ніяк не вдавалося добути будь-яку органічну речовину без участі рослин і тварин. Здавалось, це взагалі неможливо, і в утворенні органічних речовин бере участь надприродна «життєва сила», що пробуває у рослинах і тваринах. Латинською мовою слово «віта» означає «життя», тому вчених, які вірили у «життєву силу», почали називати віталістами.

Але одного чудового дня — це трапилось близько 150 років тому — німецький хімік Велер добув із своєї хімічної реторти кристалічну речовину, яку досі добували тільки із сечі тварин. Вона так і називається сечовиною.

А тепер?.. Тепер добуто вже десятки тисяч штучних органічних речовин. Багато з них являє собою ті самі речовини, які ми зустрічаємо в організмах тварин і рослин. Але більшість з них ніколи не зустрічається ні в яких рослинних і тваринних організмах і має зовсім нові, не бачені у світі тварин і рослин властивості. Між органічною хімією і природою виникло немовби змагання — хто з них створить корисніші, потрібніші для життя людини речовини. І перемогла у цьому змаганні хімічна наука!

Про те, якими засобами здобуто було цю перемогу, і розповідається у дальших главах цього розділу.

СУЧАСНИЙ ХІМІК І ЙОГО ЛАБОРАТОРІЯ

Фізики настільки вдосконалили техніку своїх дослідів, що навчились досліджувати процеси, в яких беруть участь окремі атоми чи навіть тільки осколки їх. Вони побудували своєрідні «мишоловки» з автоматичною сигналізацією подібних частинок. Влітає частинка в таку «мишоловку», і експериментатор чує щиголь: «Я тут» або «Нас двоє!»

Який далекий від чогось подібного хімік! Він ніколи не бачив описуваної ним молекули, він навіть не чув її «голосу» «телефоном». Тим часом хімік описує свої молекули з такими подробицями, як коли б він розглядав їх у мікроскоп з мільйонним збільшенням. Мистецтво встановлювати будову молекул ми уявляємо як один з найбільш дивовижних подвигів людського розуму в його великій боротьбі за пізнання природи. Це справжня наука і водночас — одне з найбільш плодотворних мистецтв!

Воно відкрилось вперше в роботах великого російського хіміка О. М. Бутлерова в середині минулого століття, а потім працями кількох поколінь учених приведене до стану цілковитої досконалості. Двадцяте століття вже не змогло майже нічого додати до нього. Щоправда, в результаті робіт фізиків з'явилась можливість зовсім іншими шляхами перевіряти, підтверджувати і уточнювати висновки хіміків про будову молекул.

Але навіщо витрачати на все це час і працю? Хіба наша їжа стане поживнішою через те, що ми пізнаємо будову її молекул? Хіба через це ліки стануть більш цілющими? Хіба літаки літатимуть швидше, коли ми пізнаємо будову молекул пального, що надходить у циліндри їх двигунів? Хіба... Але перейдемо від запитань до відповідей.

Так, саме встановлення будови молекул дозволило зробити їжу поживнішою, ліки — більш цілющими, збільшити швидкість і вантажопід'йомність літаків і добитись інших не менш значних успіхів у великому змаганні вчених з природою!

Трапляється, що головна частина роботи хіміка закінчилась, коли сторонньому спостерігачеві здається, що він тільки-тільки приступає до роботи. Хімік перестає порпатись у наукових журналах, розмірковувати, креслити на папері химерні узори структурних формул і розв'язувати рівняння. Він озброюється димчастими окулярами, складає з колб, реторт, трубок і холодильників складну і красиву споруду, відважує і вміщує в посудини потрібні вихідні речовини, розставляє пальники, іноді яскраві лампи, відкриває водяні крани і починає чекати. Час від часу він дивиться, чи не надто бурхливо йде реакція в головній посудині, чи не надто стрімливо несуться через трубку холодильників пари і чи не закупорюють її кристали. Це вже чисто споглядальна робота. Результат бурхливого зіткнення речовин у тісній колбі вже відомий і оцінений заздалегідь, якщо розрахунки і міркування, що передують досліду, проведені послідовно, до кінця. Хімік знає, чи утвориться у нього нова, ще не бачена фарба чи нова запашна речовина.

Сучасний хімік — такий же винахідник, як архітектор і машинобудівник. Різниця лише у масштабах «винаходів»: архітектор бачить споруду, яку він будує, хімік же не бачить молекул, які створює і розмножує у колбі в мільярдах тотожних екземплярів. Він лише думкою стежить за ланцюгом їх перетворень і вдосконалень. Але «креслення», з якими хімік приступає до роботи і в яких наводить різноманітні довідки, відповідають архітектурним планам і конструктивним кресленням машин. У них — в структурних формулах — зосереджена основна ідея у найяскравішому виразі, якого зумів надати їй хімік. Трапляється, що у створенні нових молекул вчений використовує ті самі конструктивні ідеї, які лежать в основі чисто механічних пристосувань і винаходів (в дальшому ми часто звертатимемось до таких несподіваних аналогій).

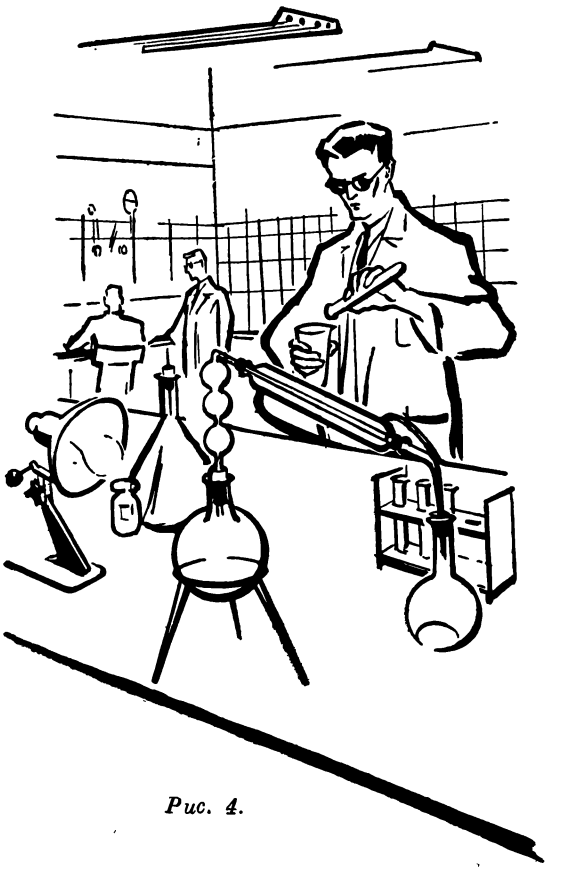


Рис. 4.

Сучасна хімія глибоко вростає у життя людей, зв'язана з ним тисячами ниток. Тому кожний повинен знати, як працює хімік, як він складає свої структурні формули, які висновки робить із них і яким способом іноді з грязі, з покидьків з допомогою цих формул викликає до життя багато сотень тисяч речовин, причому ці речовини часто настільки корисні і потрібні, що ми вже не можемо собі уявити, як обходились без них раніше.

Можливо, читачеві ніколи і не доведеться самому встановлювати структурні формули. Але тому що далі ми весь час спиратимемось на будову молекул, помилкою було б, якби ми не розповіли про це мистецтво саме стільки, щоб у дальшому розраховувати на розуміння.

ЯК ВСТАНОВЛЮЮТЬ СКЛАД МОЛЕКУЛ

Повернемось до того, що ми зустрічаємо навколо себе.

Перша органічна речовина, яка попадає нам у руки, коли ми сідаємо за ранковий сніданок, — це цукор. Поки його кусок, кинутий у склянку чаю, розчиняється, доведемо, що цукор — справді органічна речовина. Спалювати його ми вже навчились. Перекинувши над запаленим куском цукру суху склянку, ми побачимо, як зволожились її стінки, — присутність водню у цукрі доведено. Якщо ж склянка була змочена розчином гашеного вапна, стінки її стануть мутними — доведено наявність у цукрі вуглецю.

Зважимо тепер кусочок цукру, а потім спалимо його в присутності речовин, з яких одна вбирає водяну пару, а друга — вуглекислий газ. Виявляється, обидві речовини збільшаться на вазі. За цим прибутком можна встановити, що при згорянні кілограма цукру утворюється 470 *Г* води і 1 *кГ* 220 *Г* вуглекислого газу. Звідси легко обчислити, скільки вуглецю і скільки водню містилось у куску цукру, що згорів. В куску рафінаду, що важить 10 *Г*, міститься 4,2 *Г* вуглецю і 0,65 *Г* водню. Решта ваги куска — 5,15 *Г* — припадає на третій хімічний елемент — кисень. Отже, склад цукру такий:

вуглець — 42,0%,
водень — 6,5%,
кисень — 51,5%.

У розпорядженні хіміків є мініатюрні терези особливої конструкції, на яких можна точно зважити ледве видиму оком пилинку. На жаль, ще не існує терезів для безпосереднього зважування окремих молекул. Тому замість зважування молекули цукру ми будемо вимірювати температуру замерзання цукрових сиропів.

Припустимо, що надворі мороз і в нашому розпорядженні є термометр з кількома поділками нижче нуля. Такі термометри продаються в аптеках. Водні розчини завжди замерзають при температурі, нижчій, ніж чиста вода, тобто нижче 0°. Давайте розчинимо у літрі води 34,5 *Г* цукру і виставимо розчин на мороз. Виявляється, що він починає замерзати при — 0,19°. Обчислимо, скільки потрібно було б розчинити цукру, щоб розчин замерзав не при —0,19°, а при —1,90°; виявляється, що у 10 раз більше, тобто 342 *Г*.

Можете себе поздоровити: ви знайшли молекулярну вагу цукру. Вона дорівнює 342! Чому? Тому, що існує закон: при розчиненні в літрі води однієї грам-молекули будь-якої речовини — не електроліту — точка замерзання розчину знижується на одне і те саме число градусів, а саме на 1,9°.

Що ж тепер ми знаємо про молекулу цукру? Що вона важить 342 кисневі одиниці, що до складу її входить стільки-то атомів вуглецю, стільки-то атомів кисню і стільки-то атомів водню. Скільки саме, нам допоможе вирішити процентний склад цукру: 42%C, 51,5% O і 6,5% H. Адже скільки процентів кожного елементу міститься за вагою у тонні цукру, стільки ж — не більше і не менше — міститься і в кожній цукровій піщинці і, нарешті, в кожній окремій його молекулі. Отже, із загальної ваги молекули цукру — 342 кисневі одиниці (к. о.) — припадає

на частку вуглецю — 342 × 0,42 = 144 к. о.,
на частку кисню — 342 × 0,515 = 176 к. о.,
на частку водню — 342 × 0,065 = 22 к. о.

Розкриємо періодичну таблицю Д. І. Менделєєва і знайдемо в ній атомну вагу вуглецю (12), кисню (16) і водню (1). Тепер легко дізнатись, що в молекулу цукру входить 144 : 12 = = 12 атомів вуглецю, 11 атомів кисню і 22 атоми водню, тобто молекулярна формула цукру — $C_{12}H_{22}O_{11}$.

Звичайно, цього ще не досить, щоб уявити собі будову молекули цукру, як не досить знати, які матеріали і в якій кількості витрачені на зведення будинку, про який ми хочемо скласти уявлення. Але будова молекули цукру надто складна, щоб варто було далі займатися нею. Як хімік переходить від молекулярної

формули речовини до її структурної формули, покажемо на простішому прикладі — на винному спирті. Молекулярна формула його далеко простіша, ніж формула цукру, — C_2H_6O.

ХІМІЧНЕ ДОМІНО

Багато дехто заповнює своє дозвілля нехитрою грою в доміно. Ось перед вами дев'ять дощечок «хімічного доміно». Умови гри ті самі, що і в звичайному доміно: потрібно звільнитися від дощечок, приставляючи їх одну до одної так, щоб усі рисочки на них злилися одна з одною і щоб невикористаних дощечок не залишилось. Але перед вами немає противника, який намагається «ходом» своєї дощечки перешкодити вам, зірвати ваш план. Ви граєте самі.

Припустимо, ви взяли одну з дощечок, помічених буквою «С», з чотирма рисочками і приставили до неї чотири півкруглі дощечки, помічені буквою «Н», які мають лише одну рисочку. Утворилась фігура, зображена на рис. 5. Гру програно, тому що в цій фігурі не залишилось вільних рисочок, до яких можна було б приставляти дальші дощечки, а їх у вас в руках ще чотири.

Але становище можна виправити, забравши одну з півкруглих дощечок і приставивши на її місце або другу дощечку С, або дощечку, позначену буквою «О». У першому випадку утвориться така фігура, як на рис. 6,*а*, а в другому — як на рис. 6,*б*.

Якщо в цих нових фігурах ми знову займемо всі вільні рисочки півкруглими дощечками, гру знову буде програно. Адже спочатку у нас на руках залишиться три дощечки (рис. 7), потім — одна: її нікуди буде приставити (рис. 8).

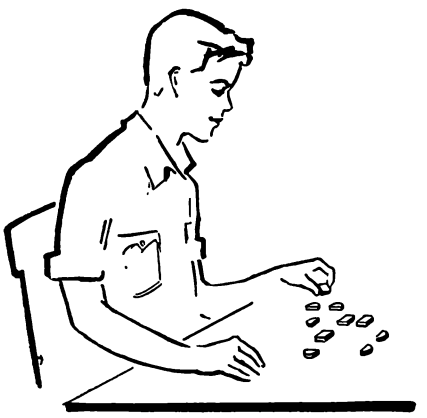
Потрібно знову виправляти становище. Забираємо з цієї і другої фігури по одній дощечці Н і приставляємо замість неї у першому випадку дощечку О, що залишилась, а в другому — дощечку С. І в тому і в другому випадку «партія» тепер буде виграна зразу. У другому випадку у приставленої дощечки С є три вільні рисочки. Слід тільки до них приєднати три півкруглі дощечки, що залишились. Точно так само у приставленої дощечки О в першому випадку є вільна рисочка, до якої приєднується остання півкругла дощечка, і на руках знов-таки нічого не залишається (рис. 9 і 10).

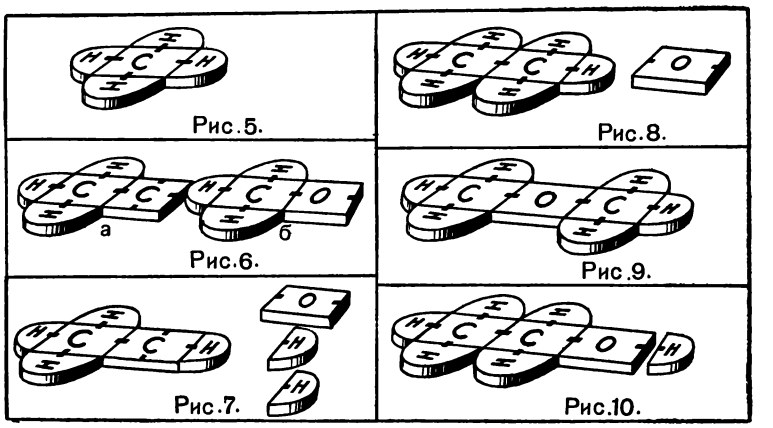
Таким чином, завдання нашого «хімічного доміно» має не один, а два розв'язки.

Звичайно, ви здогадались — не випадково на дощечках написані значки вуглецю, кисню і водню, не випадково, що цих дощечок рівно стільки ж, скільки атомів у молекулі, і що рисочки на них позначають валентність кожного атома. Отже, ми прийшли до двох можливих схем будови для молекул спирту. Але яка ж із них відповідає дійсності?

Тут ми згадуємо про існування цікавого металу, добування якого зв'язане з великими труднощами. Це натрій. Він м'який, як віск, і дуже бурхливо взаємодіє з водою.

Кинутий у воду, він миттю сплавлюється у блискучу кульку, бігає з шипінням і вибухами взад і вперед, безперервно зменшуючись у розмірах, доки не розчиниться цілком. Тому куски натрію зберігають у закупорених склянках під шаром гасу. Гас — суміш хімічних сполук, що складаються з водневих і вуглецевих атомів. Очевидно, що хімічні зв'язки між цими атомами натрій неспроможний розірвати. А як поводитиметься натрій у спирті? Чи не допоможе він нам розв'язати завдання про будову молекули спирту?





У першій, розглянутій нами схемі молекули (рис. 9) всі шість атомів водню цілком рівноцінні, всі вони зв'язані, як і в молекулах, що утворюють гас, безпосередньо з вуглецевими атомами. Якби молекула спирту була побудована за цією схемою, ми мали б підставу чекати, що натрій у спирті зберігатиметься так само добре, як і в гасі. Зовсім іншу картину дає друга схема (рис. 10). З шести водневих атомів у ній тільки п'ять примикають до атомів вуглецю, а шостий зв'язаний через кисень, як у воді. Отже, речовина з такою будовою молекули повинна реагувати з натрієм так само, як вода, і одна шоста частина водню, що міститься в ній, при взаємодії з натрієм повинна витіснятись.

Залишається кинути кусочок натрію у спирт і подивитись, що буде далі. Натрій розчиняється, хоч і не так бурхливо, як у воді. Продукт реакції — біла маса — нічим не нагадує спирт, але молекула його, як і раніше, містить дев'ять атомів. В їх числі ми знайдемо один атом натрію, що зникнув, замість одного водневого атома, що виділився у повітря. Тепер у нас не може бути сумніву, що молекула спирту побудована за другою схемою.

Але існує і інша речовина з таким же, як спирт, складом молекули — метиловий ефір. Вона далеко більш летка і має якраз ті властивості, яких слід чекати у речовини, молекула якої побудована за першою схемою. Таким чином, невелика перестановка атомів у молекулі має дуже великі наслідки. Якщо не метиловий ефір, то найближчий його родич — етиловий ефір — із злегка подовженою, але побудованою цілком за таким же принципом молекулою був відомий людям майже так само давно, як спирт. Тоді вже знали, що кури, наклювавшись змоченого цим ефіром зерна, стають нечутливими до больових відчуттів. Але тільки через століття спочатку зубні лікарі, а потім хірурги застосували етиловий ефір для того, щоб приводити своїх пацієнтів у несвідомий, нечутливий до болю стан під час операцій.

Однаковий склад молекул при різній їх будові і властивостях—настільки поширене явище, що для нього потрібне було нове слово — «ізомерія». Замість того щоб говорити: у цих двох речовин однаковий склад молекул, ми говоримо: ці речовини — ізомери.

Отже, ми виявили дві речовини із складом C_2H_6O. Обидві вони справді відповідають за своїми властивостями двом єдино можливим схемам будови молекули, які передбачає теорія. Ми не можемо в думці створити образ третьої речовини із тим же складом молекули, інакше кажучи, третього ізомеру, і в природі його теж немає. Зауважимо, що чим складніша молекула, тим більше число ізомерів можливе для неї.

Для сполук цього типу характерне ланцюгоподібне зчленування вуглецевих атомів. Ланцюжки ці можуть розгалужуватись, причому дуже різноманітно. Вони дуже міцні і являють собою в органічній молекулі те саме, що скелет у тварин. Подібні ж прості або розгалужені вуглецеві ланцюжки містяться у безлічі органічних речовин — у нафтах, жирах і т. д.

Але є органічні речовини, до яких зовсім не можна застосувати «ланцюгові» уявлення. Найпростіша з них — б е н з о л. Це летка речовина, що нагадує властивостями гас або бензин; але вона мало підходить для заправки гасових ламп, тому що при згорянні дає багато кіптю. В молекулі бензолу міститься лише два елементи: вуглець і водень, і того і другого — по шість атомів. Ніякими хімічними реакціями не вдалося встановити, що атоми вуглецю і атоми водню займають у молекулі бензолу нерівноцінні положення. Вже через одне це молекула його не може мати форми ланцюжка. Адже в кожному досить довгому ланцюгу є крайні і середні — нерівноцінні ланки. Найпростіше припущення, яке можна зробити щодо будови молекули бензолу, — це уявити її у вигляді кільця. Кільце — це найпростіша геометрична фігура, всі точки якої геометрично рівноцінні. Правда, цю умову задовольняють і деякі інші фігури, наприклад тригранна призма. Ось як зроблено було правильний вибір.

Якщо замістити в молекулі бензолу (рис. 11) один з атомів водню атомом хлору, то внаслідок рівноцінності усіх шести атомів водню в ній завжди утвориться один і той самий продукт, який би атом водню не зазнавав заміщення. А якщо тепер повторити заміщення

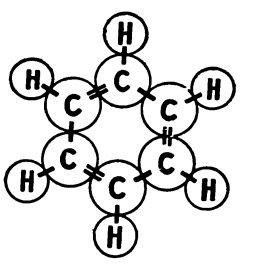


Рис. 11.

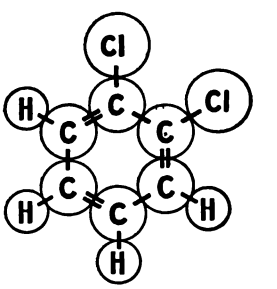


Рис. 12.

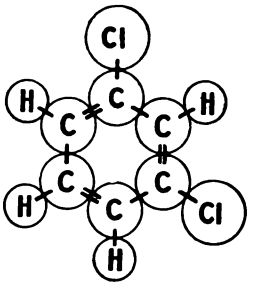


Рис. 13.

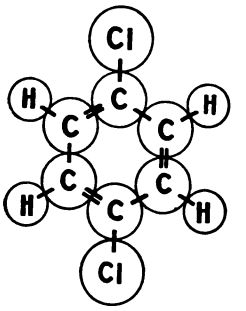


Рис. 14.

водню хлором, утворяться вже три різні ізомери, залежно від того, в яких умовах відбулася реакція. Кільцеподібна схема молекули бензолу це пояснює: два атоми хлору можуть примкнути або до сусідніх вуглецевих атомів (рис. 12), або через один (рис. 13), або до протилежних (рис. 14). Призматична ж фігура дасть більше, ніж потрібно, число ізомерів.

Так було доведено кільцеву схему молекули бензолу. На цій схемі базуються широко розвинуті галузі практичної хімії. Наприклад, у виробництві барвників дослідження і синтези нових барвників розпочинають, виходячи з кільцеподібної структурної формули бензолу.

Ланцюг і шестиланкове кільце — ось два способи зчленування вуглецевих атомів, які особливо часто практикуються природою і запозичені у неї хіміками-органіками. Мабуть, більшість природних органічних речовин побудована за принципом ланцюгів. Більшість же штучних органічних сполук (барвників і вибухових речовин, ліків) містить у собі вуглецеві кільця. Але найчастіше у молекулі комбінуються розгалужені ланцюги і кільця, отже, структурна формула набуває іноді дуже химерного вигляду.

Тут цікаво пригадати один винахід хіміків. Щоб керувати своїми колоніями, імперіалістам потрібно тримати там велику кількість урядовців, солдатів і місіонерів. Тим часом у деяких колоніях незвичний для європейців клімат: попадаючи в тропіки, вони стають жертвами тропічних захворювань.

Найстрашнішим для європейців виявилось захворювання, що поширилось близько півстоліття тому на берегах Конго і по інших європейських володіннях в Африці. Воно було назване сонною хворобою, тому що наприкінці її, коли збудник добирається до мозку, людина після спалахів неприродного збудження впадає у тяжкий, свинцевий сон. Вона може спати будь-якого часу, в будь-якому положенні, аж до того моменту, коли її настигає майже неминуча смерть.

І ось, коли поваленій у першій світовій війні Німеччині диктували умови мирного договору, союзникам стало відомо, що там винайдено речовину, будова молекули якої зберігається як державна таємниця. Не випадково цю речовину було названо германіном.

Не знайшли підстави заборонити Німеччині виробництво германіну, бо це не була ні нова вибухова, ні отруйна речовина. Зовсім навпаки: це був виняткової сили засіб проти сонної хвороби.

Кращі сили славетного Пастерівського інституту в Парижі були скеровані на розгадку таємниці германіну. Справа здавалася простою і звичною: спочатку якісний аналіз ліків, потім кількісний; визначення молекулярної ваги, далі молекулярної і, нарешті, структурної формули. А оскільки відома структурна формула речовини, вже неважко розробити технологію її добування шляхом синтезу.

Звичайно, у складі германіну виявили вуглець і водень, потім і кисень. Але цим список елементів не вичерпався. Коли французькі хіміки добрались, нарешті, до молекулярної формули германіну, виявилось, що вона має такий вигляд:

$$C_{51}H_{40}O_{17}S_4N_6.$$

Молекула виявилась найскладнішою з молекул речовин, які вживались до того часу в медицині. Але коли ми пригадаємо, що навіть такій простій молекулярній формулі, як C_2H_6O, вже відповідають два ізомери, то неважко собі уявити, яка безліч ізомерів відповідає формулі германіну. І хоч дещо про добування германіну було відомо з опублікованих раніше праць німецьких учених, французьким хімікам довелося побудувати, можливо, добру сотню речовин, поки у сто першій розташування атомів було саме таким, як у молекулі германіну.

СВІТ, ВІДБИТИЙ У ДЗЕРКАЛІ

Роздивіться рисунок на стор. 651. Які (їх принаймні шість) недоречності вам удасться у ньому виявити? Насамперед впадає в око, що людина пише листа не правою, а лівою рукою. А втім, можливо, вона лівша? Але навіщо їй спала на думку фантазія надіти годинника не на ліву, а на праву руку? Що це за знайома і водночас дивно незнайома картина висить на

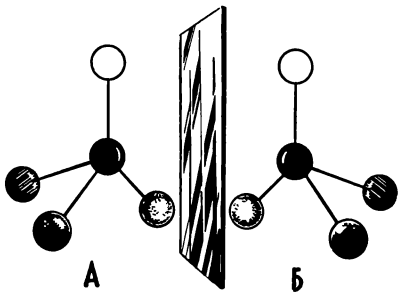


Рис. 15.

стіні? Далі, хіба існує така марка телевізора? Але подивіться на циферблат годинника — і фокус розгадано. Усе дуже просто. Людина — не лівша, годинник надіто у неї нормально, на ліву руку, телевізор загальновідомої марки — «Темп». Винен художник: він показав зображення кімнати таке, як воно має вигляд у дзеркалі.

А тепер подивіться на рис. 15. На ньому показані схеми двох дуже простих за складом молекул в їх просторовому вигляді. Вони настільки схожі одна на одну, що різниці між ними ми не відчуваємо. Тим часом вони намальовані саме з таким розрахунком, щоб різниця якнайрізкіше впадала в око. Ці молекули різняться одна від одної так, як ліва рука відрізняється від правої або як відрізняється предмет від свого зображення у дзеркалі. У звичайному житті такої різниці ми не помічаємо і говоримо про повну схожість предметів.

Але спробуйте, нарисувавши на папері будь-яку фігуру (хоч би таку, як на рис. 15), обвести її вдруге олівцем, не слідкуючи безпосередньо за його рухом, а дивлячись у дзеркало. Вам доведеться відмовитись від цього важкого завдання і визнати, що предмет і його відображення у дзеркалі — далеко не одне і те саме з погляду геометрії. Суть відміни полягає в тому, що ніяким поворотом модель молекули *А* не можна поставити так, щоб око дістало від неї точнісінько таке ж зорове враження, як і від молекули *Б*.

Цікаво, що варто трохи спростити модель молекули, наприклад пофарбувати одну із бічних кульок у той же колір, в який пофарбовано одну із трьох інших, і можливість мати молекулу, так би мовити, у двох дзеркально протилежних виглядах зникне. Простим поворотом однієї з моделей можна добитись повного зорового суміщення її з власним дзеркальним відображенням. В усьому цьому ви можете переконатись, якщо самі зліпите із різнобарвного пластиліну подібні моделі молекул.

Уявімо тепер, що світ, який ми бачимо у дзеркалі, справді існує і ми проникли в нього, подібно до героїв якоїсь казки. Нас зустрінула б там сила несподіваностей. Багато отрут цього світу були б для нас нешкідливими, а багато ліків втратили б свою силу. Солодкі речовини мали б інший ступінь солодкості, і іншими були б аромати квітів. У цьому світі ми були б застраховані від багатьох хвороб, але коли б наше перебування у ньому затяглося, то ми загинули б від голоду серед численної їжі, тому що білки світу, відображеного у дзеркалі, не могли б засвоюватись нашим організмом. Чи це фантазія? І так і ні! Це штучний прийом для викладу справжніх фактів.

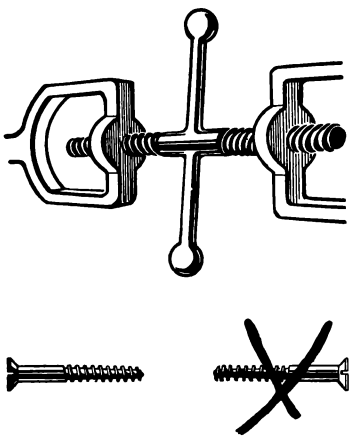


Рис. 16. Як оптичні ізомери в природі, гвинти звичайно бувають лише одного виду — правообертаючі (внизу); лівообертаючі застосовують тільки у спеціальних пристроях (наприклад, таких, як обойма для стягування троса вгорі).

Багато з органічних речовин мають таку складну молекулу, що вона вже відрізняється від свого відображення у дзеркалі. При цьому із загадкових для нас причин ці молекули зустрічаються здебільшого у вигляді однієї з двох можливих різновидностей: для одних речовин у вигляді «лівої», а для других — «правої». Коли ми спробуємо штучно створити ці ж речовини в лабораторії, то тих і інших молекул у нас завжди утвориться порівну.

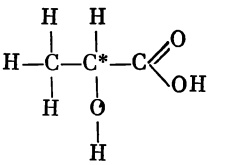
Тепер ми можемо поділити, розсортувати ці молекули і добути, таким чином, замість однієї дві речовини: одну тільки з самих «правих», а другу тільки з самих «лівих» молекул. Жодні найчутливіші інструменти не вловлять різниці в їх фізичних властивостях: у кольорі, питомій вазі, в температурах плавлення і кипіння. Це зрозуміло, тому що, вимірюючи, наприклад, температуру плавлення першої речовини, ми немовби дивимось в дзеркало на той самий дослід, що проробляється з другою речовиною. В обох випадках плавлення відбудеться у той самий момент, коли стовпчик ртуті в термометрі і на його дзеркальному відображенні досягне однієї і тієї самої висоти.

Але існують такі дві властивості — оптична і кристалографічна, — які потребують при їх описі примітки «вправо» чи «вліво». І ось тут і виявляється різниця між нашими двома речовинами. Одна з них обертає площину поляризації світла на певне число градусів, мінут і секунд вліво, а друга — на те саме число градусів, мінут і секунд вправо. Що означає «обертає площину поляризації», ви можете докладно прочитати у статті «Світло і його застосування», тепер для нас це неістотно. Ця властивість має велике застосування в лабораторній техніці, а відповідна електрична властивість речовин, що складаються із самих «правих» або самих «лівих» молекул, чи кристалів — у радіотехніці, радіолокації та ін.

Усі інші речовини з більш симетричними молекулами ні тієї, ні другої властивості не мають. Нам важливо, що живий організм іноді буває більш чутливим і розбірливим, ніж чутливі фізичні інструменти, навіть до таких мізерних відмін у будові молекул, які є у дзеркальноподібних речовин.

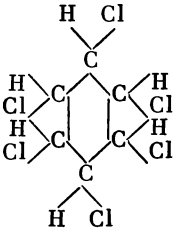
Так, існують два аспарагіни: лівий і правий. Правий аспарагін має солодкий смак, а лівий — безсмачний. Існують два нікотини — отрути, якою систематично отруюють себе курці. З цих двох нікотинів один далеко більш отруйний, ніж другий, і т. д.

Таким чином, наша фантастична мандрівка у «світ дзеркала» була не зовсім фантастичною... Ми справді можемо частково відтворити цей світ і переконатися у вірності наших уявлень щодо його несподіваних і своєрідних властивостей.



«Провинником» появи у речовин цієї властивості — обертати площину поляризації — є так званий асиметричний атом вуглецю. Він зв'язаний з чотирма обов'язково різними атомами або атомними групами. Якщо такий атом у молекулі є, то існує і обертання площини поляризації. Формула показує будову молекули молочної кислоти, що утворюється у прокислому молоці, в квашеній капусті і огірках. У ній легко виявляється асиметричний атом вуглецю (позначено зірочкою), тому що він зв'язаний з чотирма відмінними одна від одної групами атомів — CH_3, COOH, OH і H.

Але не завжди так просто виявити асиметричну будову молекули за структурною формулою речовини. Так, при дії на яскравому світлі хлору на бензол останній перетворюється у гексахлорциклогексан (або скорочено — гексахлоран). Його формула



Це, можливо, найдорогоцінніший із подарунків творчої хімії сільському господарству. Проникаючи з грунту в тканини і соки рослин, гексахлоран робить їх інсектицидними, тобто згубними для сарани і інших шкідників; для тварин же і людини ці рослини залишаються нешкідливими.

Нам важко здогадатись, що під написаною вище структурною формулою гексахлорану в дійсності ховається не більш і не менш як сім ізомерів, у тому числі і асиметричні ізомери. Особливо згубний для комах якраз один з асиметричних ізомерів, на який припадає тільки 10—13% від загальної ваги гексахлорану.

З асиметричними молекулами ми ще не раз зустрічатимемось. Тому нам і потрібно було зробити мандрівку у світ, відображений у дзеркалі.

ХІМІК У РОЛІ БУДІВНИКА

Досі хімік виступав перед нами в ролі архітектора. Познайомимось тепер з його діяльністю як будівника, що здійснює свій же власний архітектурний задум. Які прийоми він використовує?

Прикладів багато! Деякі носять ім'я дослідника, що винайшов їх, наприклад, реакція Вюрста, реакція Арбузова.

Плануючи синтез будь-якої нової речовини, хімік вибирає той чи інший з цих прийомів, пристосовуючись до відомої йому будови молекул вихідних речовин. Ми познайомимось для прикладу з прийомом, який дістав особливо велике поширення останнього часу — з полімеризацією.

Існують цілі класи речовин, молекули яких мають здатність самовільно ускладнюватись. Вони немовби не задовольняються своєю простотою і користуються усяким випадком, щоб шляхом зчеплення одна з одною переходити у дедалі складніші сполучення з цілком новими властивостями.

Найцікавіший випадок такого самовільного ускладнення органічних молекул стався у 80-х роках минулого століття.

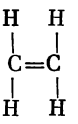
Потреба промисловості в каучуку вже тоді перевищила продуктивність тропічних рослин, що породжують його. І вчений Тільден вирішив добути каучук штучним способом. Трудність завдання полягала в тому, що точного уявлення про будову молекули каучуку ще не було. На підставі деяких міркувань Тільден вибрав як вихідний продукт летний вуглеводень — ізопрен. Але хоч яким впливам він не піддавав його, нічого втішного не вийшло.

І ось одного чудового дня вченому впала в око пробірка, з якої він забув своєчасно виплеснути її вміст. Він побачив у ній губчасту масу, яка виявилась чудовим каучуком. Навряд чи колись радість супроводилась таким засмученням: ніяких записів про цю пробірку не залишилось, і умов перетворення, що відбулось у ній, встановити не вдалося.

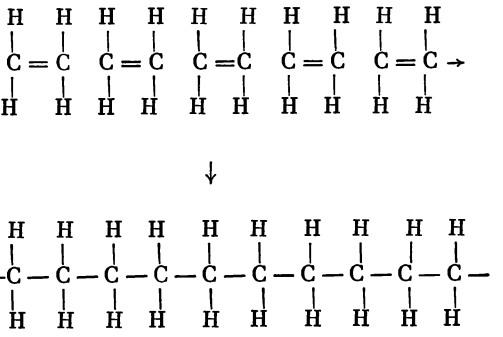
Перетворення ізопрену в каучук — типовий приклад полімеризації. У даному випадку точно відомо, що прагнення до полімеризації у молекул з'являється при наявності подвійних зв'язків.

Як правило, атом вуглецю буває безпосередньо зв'язаний з чотирма атомами-сусідами, атом кисню — з двома і т. д. Але буває, що це правило не зберігається. Наприклад, в атома вуглецю ми знаходимо іноді тільки трьох сусідів, в атома кисню — тільки одного. В таких випадках обов'язково виявиться відсутнє число сусідів і в одного з атомів, безпосередньо зв'язаних з цим першим. Ми говоримо тоді, що обидва атоми зв'язані один з одним подвійним зв'язком.

Ось його найпростіший приклад — молекула етилену:



Подвійні зв'язки у молекулах звичайно неміцні і намагаються розірватись. Це відбувається, коли дана речовина вступає в реакцію з іншими речовинами. Але це буває і без участі інших речовин. Схема



пояснює, як шляхом зчеплення одна з одною молекули можуть втрачати подвійні зв'язки

і, нарощуючи ланку за ланкою, переходити у стійкіші складні форми. Хімікові залишається тільки знайти умови, при яких відбувається полімеризація, і підібрати придатний каталізатор. Але це зовсім не просте завдання. Ще в 1910 р. російський учений С. В. Лебедєв продемонстрував на засіданні Російського фізико-хімічного товариства кусочок добутого ним штучного каучуку, проте потрібні були десятиліття напруженої роботи, щоб можна було добувати каучук за методом Лебедєва на заводах. Це звільнило нашу країну від потреби ввозити натуральний каучук з тропічних країн. Адже каучук — не тільки калоші, прогумовані плащі і дитячі м'ячі, без каучуку неможливі автомобіль і літак.

З допомогою реакції полімеризації виробляють не тільки каучук, але й різноманітні пластмаси, які щороку ширше входять до нашого побуту. Вони відомі нам у вигляді дитячих іграшок, гребінців для волосся, легкого, красивого і міцного письмового приладдя. Але вони ж стали незамінними матеріалами в електротехніці і машинобудуванні. З них виготовляють диски зчеплення в автомобілях, безшумні шестірні, вкладиші підшипників прокатних станів і багато іншого. Сировиною для виробництва пластмас служать найрізноманітніші природні матеріали, починаючи з деревини і кінчаючи етиленом. Дуже типова і повчальна історія появи на світ поліетилену, що називається іноді «королем пластмас».

Якщо ви спробуєте уявити найпростішу органічну молекулу, в якій був би подвійний зв'язок, то неминуче прийдете до молекули етилену. Це пахучий газ, який утворюється у великій кількості як покидь при переробці (крекінгу) нафти і коксуванні вугілля. З кожної тонни нафти добувають понад 100 *кГ* етилену.

Сам етилен майже не знаходить корисного застосування. (А втім, тепер вважають за краще, щоб уникнути псування в далекій дорозі, знімати фрукти недостиглими і прискорювати їх достигання штучно, безпосередньо перед продажем. Для цього на них у спеціальних камерах впливають етиленом. Але витрата етилену на достигання фруктів дуже незначна).

І перед хіміками постало завдання перетворити цей «відхід» нафтового виробництва у потрібні продукти. Особливо спокусливо було використати наявний у цій речовині подвійний зв'язок для «зшивання» молекул етилену у довгі ланцюги (тобто застосувати до етилену реакцію полімеризації). «На папері» ця реакція мала вигляд дуже простий (див. схему її вище на стор. 653).

Але виявилось, що етилен є дуже «невдячною» сировиною для добування молекул-гігантів. Перші успіхи в полімеризації етилену було здобуто лише з допомогою звичайних помічників хіміка — високих температур і тиску. Його піддали величезному тиску в 2000 *атм* одночасно з нагріванням до 200°С. Але для цього потрібні були надто складні і дорогі апарати і дуже велика витрата енергії. Майже два десятки років витрачено було на наполегливі шукання, на те, щоб здійснити полімеризацію етилену при атмосферному тиску в простих апаратах. Випробувано було як каталізатори сотні різних речовин. І творча хімія перемогла! Із сотень випробуваних каталізаторів знайшлись такі, які спричиняють полімеризацію етилену при звичайному тиску і температурі усього 60°С.

Так народився поліетилен.

Пляшка з поліетилену відрізняється від скляної меншою прозорістю. Він скоріше нагадує парафін, і це не випадково. Парафін — виділена з природної нафти суміш вуглеводнів з особливо довгими ланцюгами з вуглецевих атомів. Але у найскладнішому з них — гектані — вуглецевий ланцюг складається лише із 100 ланок.

А в молекулах поліетилену містяться десятки тисяч таких ланок. Парафін настільки м'який, що його можна дряпати нігтем, а поліетилен твердий, подібно до скла. Але скло крихке, а поліетилен гнучкий і пружний: молоток не розбиває поліетиленову пляшку, а відскакує від неї, мов від сталі. Ні повітря, ні вода не діють на нього. Поліетилен настільки легкий, що плаває на воді. Він чудовий електроізолятор. Ось скільки в нього цінних якостей.

Ці властивості відкрили поліетилену широкий шлях у виробництво кабелів високої напруги, радіолокаційної і телевізійної апаратури, легких і міцних водопровідних труб, в машинобудуванні — для виготовлення шестерень і зубчастих передач і т. д. — аж до флаконів для косметичних товарів. Поліетилен можна легко різати, стругати, обточувати, свердлити і штампувати на таких же верстатах, на яких обробляють метали, «зварювати», розм'якшуючи струминою нагрітого повітря. Хіміки можуть бути спокійні: велика праця їх, спрямована на подолання хімічної інертності етилену, не пропала даремно!

ПОЛІМЕРИ

Полімери! Це слово за останні роки міцно ввійшло в мову радянських людей, в коло їх інтересів, поряд з такими поняттями, як радіолокація, атомна енергія, термоядерна реакція, реактивний рух, міжконтинентальна ракета, радіоелектроніка. Ці поняття уособлюють науку і техніку сьогоднішнього дня.

І хоч полімери, або високомолекулярні хімічні сполуки, належать хімії, розповідь про них ми почнемо з іншої ділянки діяльності людей — з боротьби, що здійснюється нашою партією і радянським народом, боротьби за якнайшвидшу перемогу нового суспільного ладу — комунізму.

Весною 1958 р. у житті нашої країни сталася подія, яку за значенням її можна порівняти хіба тільки з іншою подією, що трапилась давно — зимою 1920 р. Тоді у самий розпал громадянської війни і іноземної інтервенції, в обстановці небаченої розрухи і голоду в країні VIII Всеросійський з'їзд Рад розглянув і затвердив, здавалося б, сугубо технічний документ, план ГОЕЛРО — «Державний план електрифікації Росії».

«Комунізм — це є радянська влада плюс електрифікація всієї країни», — такими словами охарактеризував великий Ленін основу майбутнього суспільного ладу нашої країни.

Йдучи за заповітами Леніна, у травні 1958 р. Пленум Центрального Комітету КПРС схвалив рішення по другому питанню, теж, здавалось би, безпосередньо зв'язаному тільки з наукою і технікою, — рішення про прискорення розвитку хімічної промисловості і в першу чергу про збільшення виробництва штучних волокон, пластичних мас та інших синтетичних матеріалів і виробів із них для задоволення потреб населення і промисловості.

У цьому рішенні особливого значення надається розвиткові найважливіших розділів сучасної органічної хімії — хімії штучних волокон і пластичних мас. Вони ховають у собі величезні ресурси сировини для створення достатку товарів народного споживання, високоякісних, добротних, що охоплюють буквально всі мислимі і немислимі ще галузі застосування. У розвиток однієї тільки цієї промисловості у найближчу семирічку Радянська держава вкладає понад 100 млрд. крб.

Пленум ЦК КПРС, що відбувся в червні 1959 р., присвячений прискоренню технічного прогресу в промисловості і будівництві та заходам по впровадженню комплексної механізації і автоматизації виробництва, звернув особливу увагу на першочергове оснащення устаткуванням машинобудівної і хімічної промисловості як бази для технічного переозброєння усього народного господарства.

Ці рішення показують, яким шляхом повинна піти хімічна промисловість. Максимально можлива комплексна механізація і автоматизація хімічного виробництва, впровадження прогресивної технології допоможуть народному господарству добитись повного достатку продуктів хімії і в першу чергу синтетичних речовин. Саме таким способом можна у найкоротший час дістати в будь-якій кількості тканини, які не бояться вологи, дії кислот, міцніші, ніж шовк і полотно, не мнуться, мають цілющі властивості та багато інших незвичайних якостей. Тільки синтетична хімія може дати матеріали, які не розчиняються у найсильніших кислотах і витримують нагрівання, при якому природні речовини зразу ж обвуглюються чи згоряють. Ця нова галузь хімії створює матеріали, міцніші за сталь, легші за пробку, еластичніші і тривкіші, ніж каучук, стійкіші проти дії часу і клімату, ніж дерево, цегла і навіть цемент. Синтетичні масла не замерзають на найлютішому морозі, а штучні хутра у багато разів дешевші, міцніші, красивіші, легші і зносостійкіші, ніж хутра найрідкісніших тварин.

Спираючись на практично невичерпні джерела вугілля, нафти, сланців, природних газів, хімічна промисловість уже в 1965 р. зможе виробляти нові штучні речовини і матеріали, які цілком чи частково заміняють багато металів, причому випускати їх будуть стільки, що це немовби подвоїть існуючу металургійну базу.

Успішно змагаючись з природою, хімія створює «другу природу» — зовсім нові речовини, що ніколи і ніде не існували, з найдивовижнішими, незвичайними властивостями, які далеко перевищують усе, що здатний створити живий і неживий світ.

Розвиток сучасної хімії досяг уже такої міри, що протягом одного-двох десятиліть вона одна зможе одягти, взути, дати притулок усьому людству, не вдаючись до благ живої природи!

У створенні цієї «другої природи» вирішальна роль належить цариці хімії — органічній хімії і її перлині — хімії полімерів, або, як її інакше називають, хімії високомолекулярних сполук.

МОЛЕКУЛИ-ГІГАНТИ

Тим часом як молекули неорганічних речовин складаються з небагатьох атомів, молекули органічних речовин можуть складатись із десятків і сотень тисяч атомів.

Молекули-гіганти! Величезні ланцюжки — *полімери*, утворені із простих і зовсім коротеньких ланок — *мономерів* (рис. 1— кольорова таблиця на стор. 656). З таких молекул-ланцюжків складаються і клітини живої матерії — рослин і тварин.

Протягом мільйонів років природні гігантські молекули, або високомолекулярні сполуки, забезпечували людину їжею, одягом, теплом, притулком. Досить тільки подивитись навколо. Ось перед нами дерево. Деревина його складається з полімерів, молекул-гігантів. М'ясо і шерсть тварин — знову полімери. Вуглеводи і білки у зернах злаків — теж полімери. Волокна бавовни, шовку і безліч інших природних речовин — усе це члени великої сім'ї полімерів.

Протягом тисячоліть людина просто брала від природи усі ці блага готовими. Коли ж людина у всеозброєнні набутого століттями досвіду звернулась до речовин, з яких складений органічний світ, перед нею відкрились невичерпні і неосяжні простори. Понад три мільйони хімічних сполук знають тепер хіміки-органіки.

І проте високомолекулярні сполуки аж до недавнього часу становили для хіміків загадку, «книгу за сімома печатками». Свої найбільші багатства природа створювала з найскладніших молекул, які тільки можна собі уявити.

Ці неймовірно складні структури, вироблені у процесі розвитку живої матерії, мають виняткову живучість і пристосовність до навколишніх умов, нескінченну різноманітність корисних властивостей і якостей.

РОДОВІД ВЕЛИКИХ МОЛЕКУЛ

Спроби хіміків розгадати таємниці будови гігантських молекул були першим сміливим викликом природі. Слідом за розкриттям таємниць природних високомолекулярних сполук хіміки повинні були неминуче прийти до створення нових речовин, які природа не подбала зробити сама. Ці успіхи не прийшли самі собою. Вони увінчують більш як столітній період розвитку органічної хімії.

Вперше рука вченого піднялася на найбільшу таємницю хімічної будови живої матерії на початку минулого століття, коли німецькому хімікові Ф. Велеру першому вдалося синтезувати в пробірці органічну речовину — сечовину (NH_2CONH_2).

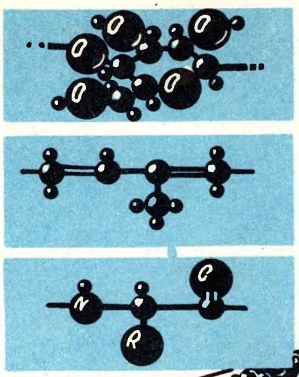
З часом структурна теорія дозволила встановити будову і розкласти по «поличках» сотні тисяч різних речовин — від найпростішого природного газу метану до зміїної отрути. Після цього численна армія хіміків-органіків зосередила свої сили на боротьбі за створення органічних речовин штучним способом — синтетичних барвників, ліків, духів, палива і багато, багато іншого. При цьому таємною мрією кожного хіміка було добування нової речовини у вигляді красивих кристалів. Коли в ході тих чи інших реакцій замість кристалів випадково утворювались високополімерні речовини, хіміки зазнавали великого засмучення. І було чого засмучуватись. Стінки їх колб вкривались липкою смолистою або гумоподібною гряззю, яку нічим не можна було ні відмити, ні видалити. Справа закінчувалась тим, що посуд викидали разом із вмістом. Тому хіміки всіляко уникали мати справу із смолами. І тільки окремих ентузіастів цікавили ці хімічні «золушки».

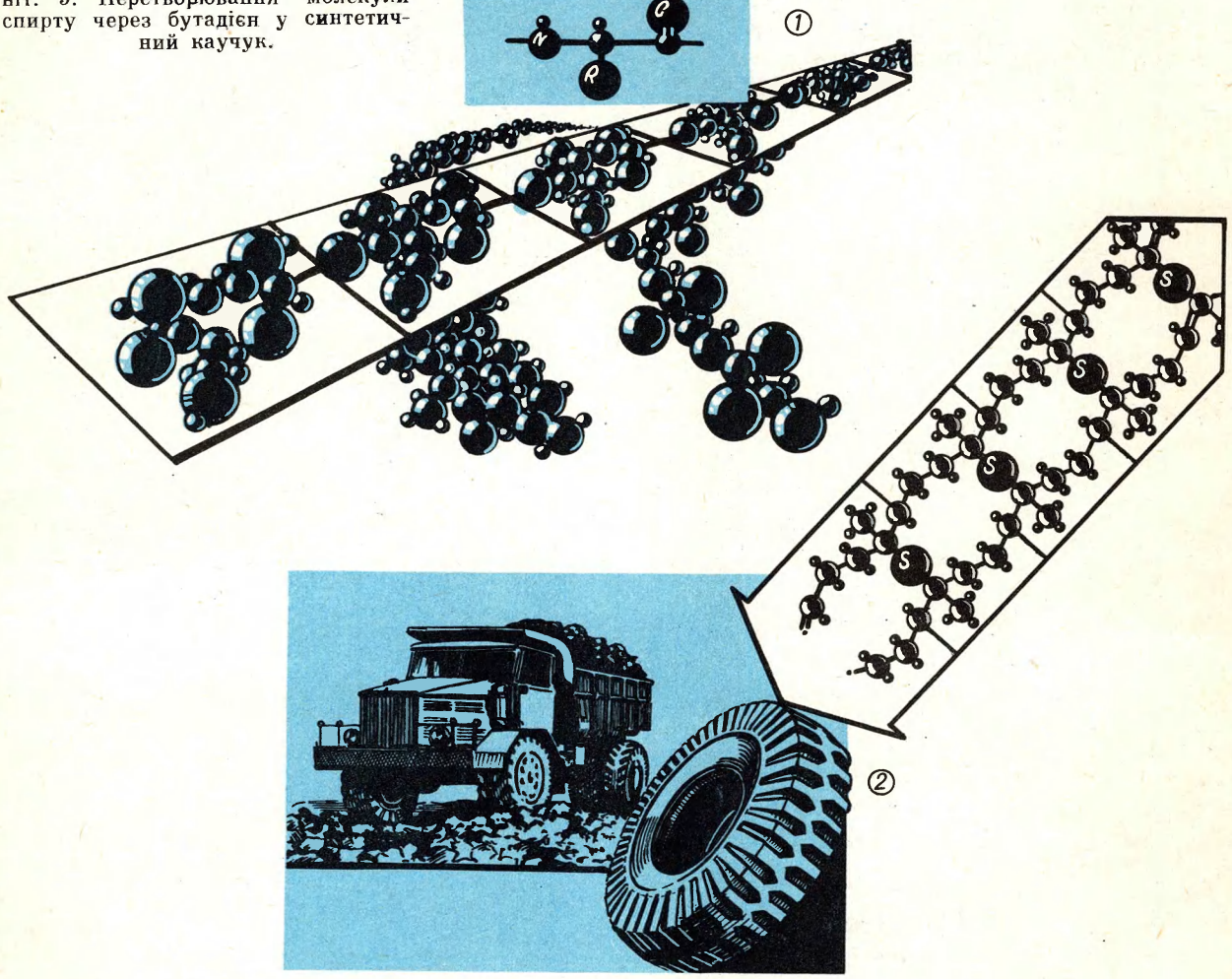
Перші спроби встановити хімічний склад целюлози (основна речовина деревини), каучуку і навіть білка належать до кінця XIX ст. Ці речовини, як і всі інші органічні сполуки, складаються з дуже небагатьох видів атомів, головним чином з вуглецю, водню і кисню. Так, целюлоза — речовина зовсім не плавка і ні в чому не розчинна — схожа за хімічним складом з легкорозчинною і плавкою цукристою речовиною — глюкозою.

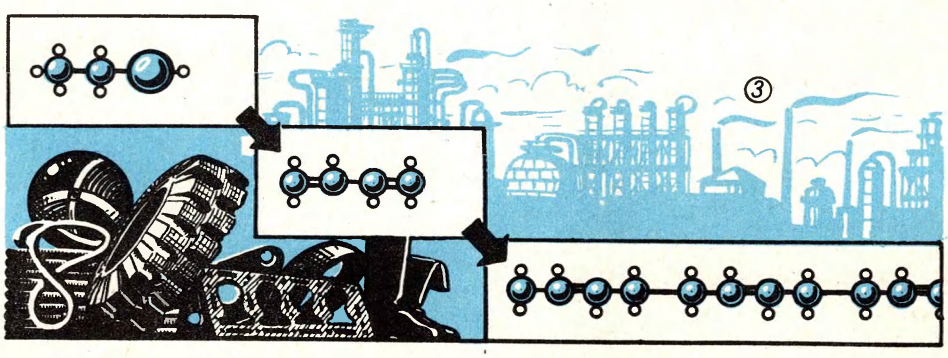
Основна особливість згаданих речовин не в складі, а в розмірі їх молекул. Це підтверджується хоч би тим, що здатність розчинятись і плавитись, властива звичайним органічним речовинам, наприклад різним вуглеводням, що містяться у нафті, неперервно зменшується в міру збільшення кількості атомів у їх молекулах.

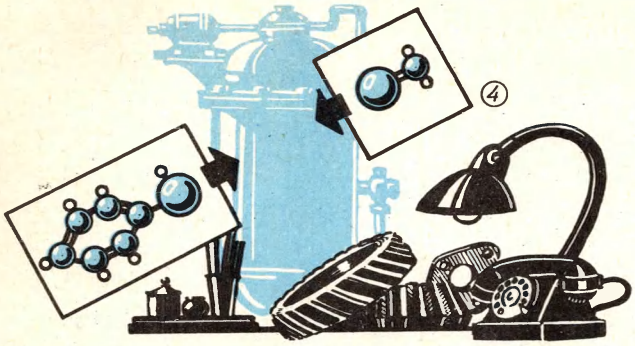
Звідси висока механічна міцність волокон бавовни (целюлоза) і шерсті (білок) і зовсім вже дивовижна міцність волокон шовку. Нитки цих речовин складаються з дуже великих, міцно зчеплених одна з одною молекул. А тому що до складу цих молекул входить тільки дуже обмежена кількість видів атомів, то хіміки цілком логічно припустили, що такі гігантські молекули складаються з окремих «цеглинок», що періодично повторюються, які самі по собі мають невеликі «нормальні» розміри. Так воно насправді і виявилось. Гігант-

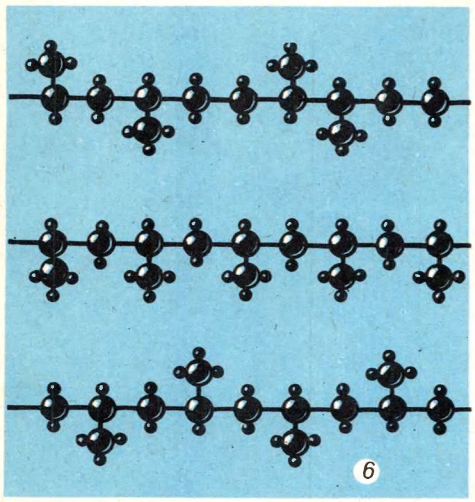
1. Полімерні молекули складаються з груп атомів, що багаторазово повторюються і становлять немов ланки молекулярного ланцюга; угорі — ланки молекул целюлози, каучуку та білка. *2.* При зчепленні лінійних молекул каучуку атомами сірки каучук перетворюється в гуму та ебоніт. *3.* Перетворювання молекули спирту через бутадієн у синтетичний каучук.

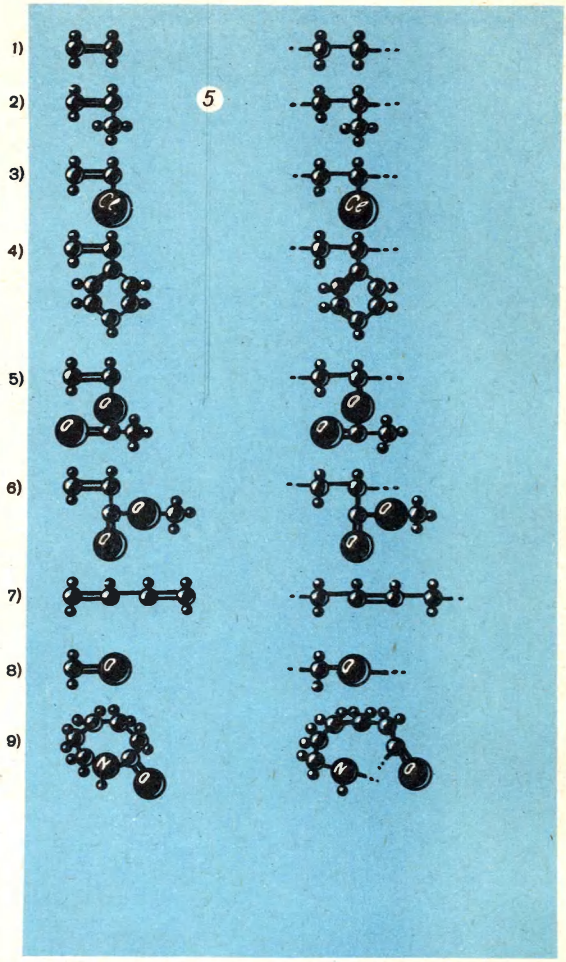


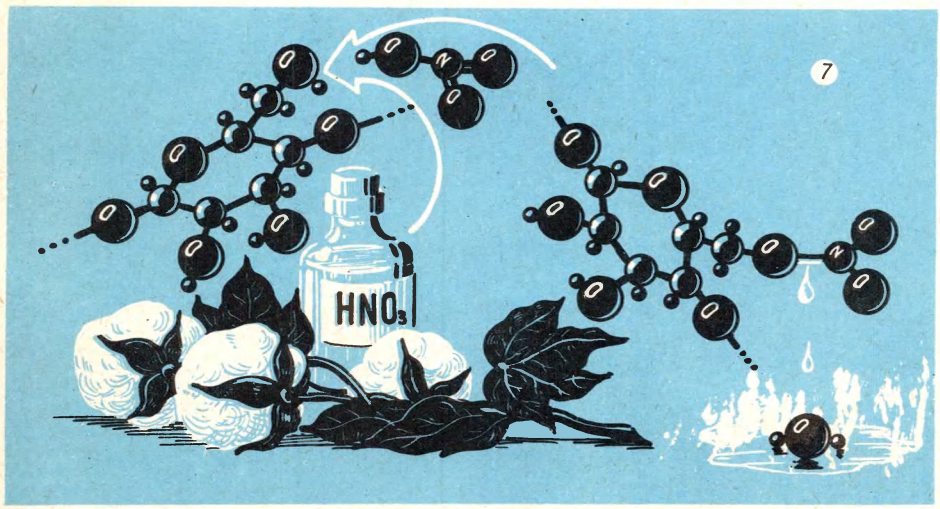




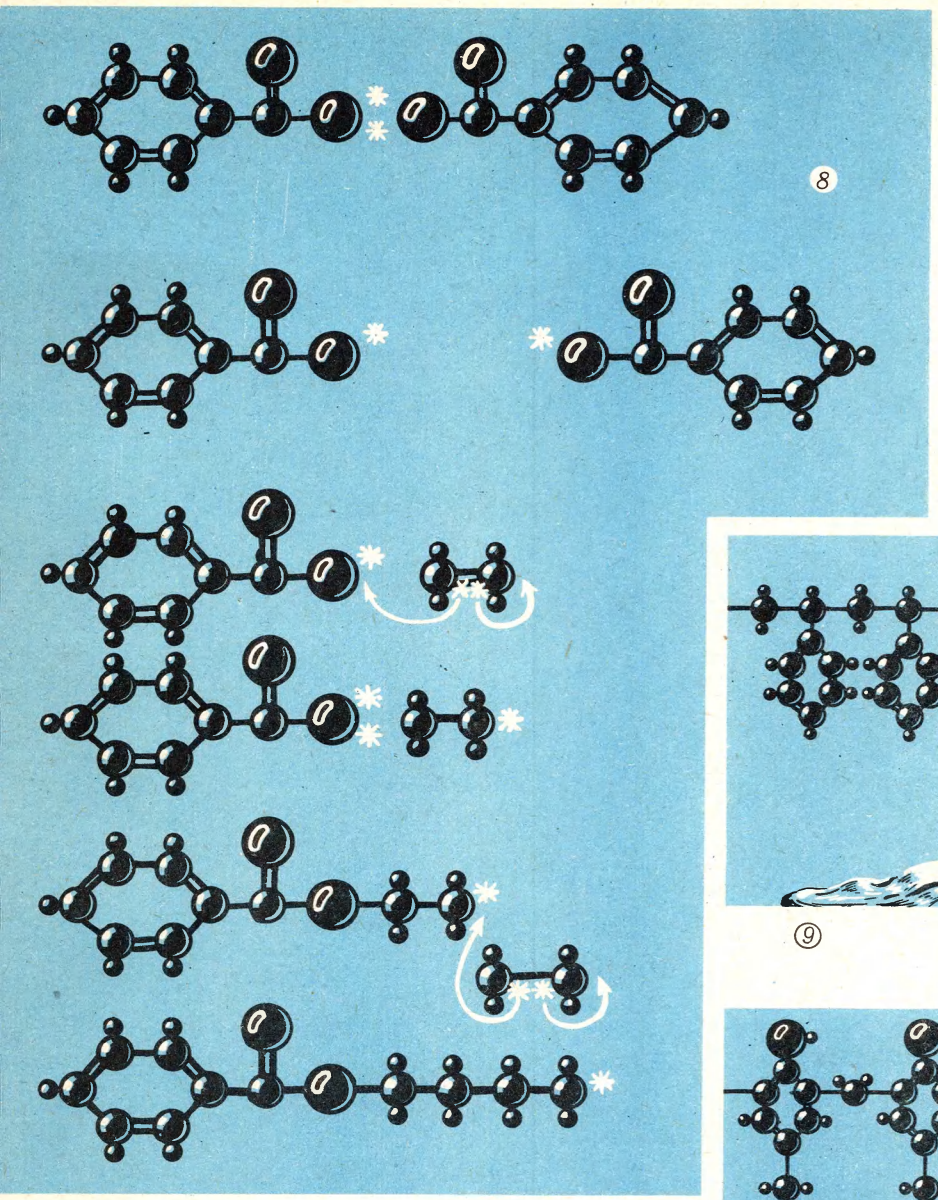




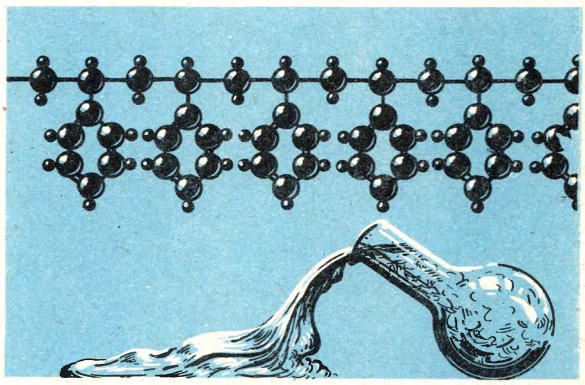




4. З фенолу (зліва) і формальдегіду (справа) дістаємо бакеліт. *5.* Найважливіші мономери (проти кожного зображено відповідну йому ланку полімера, що утворюється при розмиканні подвійного зв'язку в мономері): 1) етилен, 2) пропілен, 3) хлорвініл, 4) стирол, 5) вінілацетат, 6) метилакрилат, 7) дивініл, 8) формальдегід, 9) ε-капролактам. *6.* Угорі — атактичний поліпропілен, посередині — ізотактичний поліпропілен, унизу — синдіотактичний поліпропілен. *7.* Приклад реакції конденсації — перетворювання целюлози дією азотної кислоти в нітроцелюлозу; «відхід» — вода.

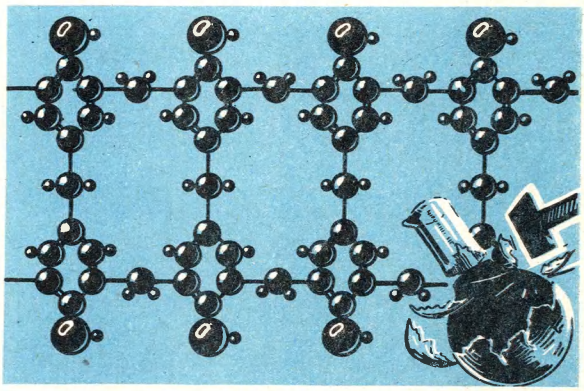


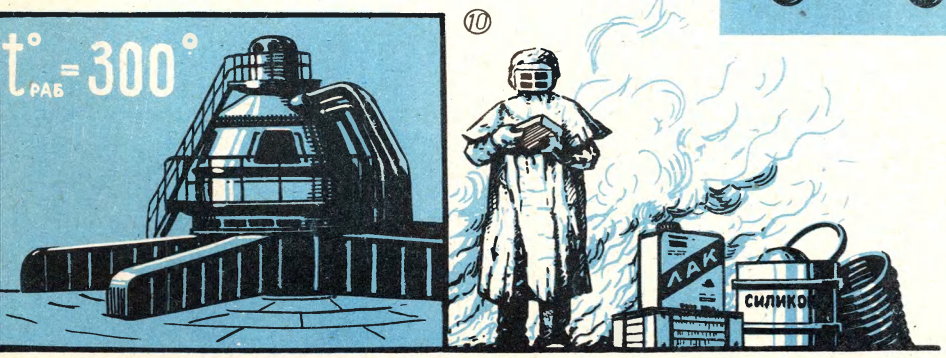
8. Механізм радикальної полімеризації — утворення поліетилену з етилену з участю як ініціатора перекису бензолу. Електрони, що беруть участь в утворюванні нових зв'язків, зображено зірочками, переміщення їх — стрілками. Перший ступінь — молекула перекису розщепилась на два радикали. Другий ступінь — молекула етилену приєдналась до радикала — ланцюгова реакція почалась. Третій ступінь — до активного (правого) кінця нового радикала приєдналась наступна молекула етилену — почалось наростання ланцюга ланка за ланкою.



⑨

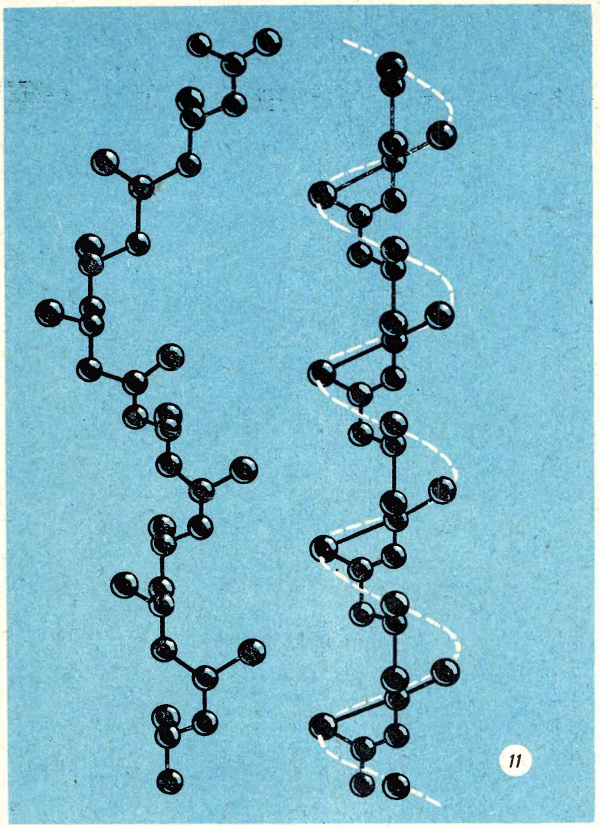
⑨а

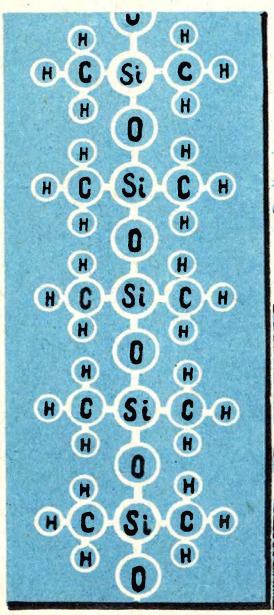




⑩

9 і *9а.* Термопластична смола (вгорі), термореактивна смола (внизу). *10.* З силікону роблять електроізоляцію, що витримує високі температури.





11. Будова вуглецевого скелета атактичного (зліва) та ізотактичного (справа) високополімерів. *12.* «Щеплення» одного полімера до другого нагадує щеплення рослини в садівництві. *13.* Предмети, виготовлені з силоксанів: зліва — зразок структури силоксанів.

ська молекула целюлози, наприклад, — це немовби ланцюжок з молекул глюкози. Молекула каучуку складається з набору молекул ізопрену, а молекула одного з найпростіших видів білка — немовби з молекул амінокислот. Саме з цієї причини таким речовинам хіміки почали надавати назви з приставкою «полі» (багато). Целюлозу, наприклад, почали називати полісахаридом, підкреслюючи цим, що вона утворена з багатьох молекул цукру.

Коли така молекула має дуже великі розміри, то речовину називають вже високополімерною.

Так народилась сучасна термінологія хімії гігантських молекул (високомолекулярних сполук). Точне знання хімічної структури більшості відомих полімерів прийшло значно пізніше. Але це вже не могло служити перешкодою для штучного добування з них нових високомолекулярних речовин. Знайдено було практичні способи перетворення целюлози у так званий ацетатний шовк, у плівку для кіно, красиві блискучі лаки і фарби, іграшки.

Іншою галуззю промисловості, що швидко розвивається, стало виробництво гумових виробів. Воно почало рости після того, як на початку XIX ст. Ч. Гудьїр відкрив спосіб перетворення каучуку в гуму шляхом вулканізації, тобто нагрівання каучуку разом із сіркою (рис. 2 — кольорова таблиця на стор. 656). Це надавало каучуку міцності і твердості. А на початку XX ст. бурхливими темпами почала розвиватись автомобільна промисловість, яка тепер споживає понад 85% гуми в усьому світі.

Скромнішою була галузь застосування білків і вуглеводів, що використовуються як сировина для штучної шкіри, клеїв і навіть казеїнових (казеїн — основа сиру) пластичних мас, з яких робили гребінці, посуд, прикраси і т. д.

ПЕРШІ ШТУЧНІ ПЛАСТМАСИ

У науці, особливо російській, завжди знаходились учені, які заглядали на десятиліття, а іноді і на цілі століття вперед і не знаходили в своїх геніальних здогадах підтримки офіціальної науки і властей. Так було і з першими вченими, що відкривали синтетичні високомолекулярні речовини. Великий російський хімік О. М. Бутлеров ще в середині XIX ст. першим відкрив принципи їх добування з низькомолекулярних сполук (полімерів з мономерів) з допомогою реакції полімеризації (див. стор. 653—654).

Ці роботи мали величезний вплив на весь дальший розвиток хімії. В 1909 р., застосовуючи методи Бутлерова, С. В. Лебедєв намагався з бутадієну (газоподібного продукту, що утворюється з спирту) добути нові полімерні речовини і дістав дещо дуже схоже з природним каучуком (рис. 3 — кольорова таблиця на стор. 656). Після Жовтневої революції йому вдалося вперше в світі створити штучний каучук (СК). У 1931 р. у нас в країні було організовано промислове його виробництво.

На початку XX ст. відбулася і інша подія, що різко змінила ставлення хіміків до тих речовин, які раніше тільки забруднювали лабораторний посуд. Молодий бельгійський хімік Х. Бекеланд несподівано зацікавився в'язкою рідиною, що утворюється в результаті реакції між двома давно відомими речовинами — фенолом і формальдегідом, — розчиненими у воді.

Одного разу, нагріваючи цю рідину під тиском, він несподівано добув тверду і прозору речовину, яка виявилась носієм цілого ряду надзвичайно корисних властивостей.

Ця речовина чудово витримувала високу температуру, не розчинялась у воді, була дуже стійка проти дії різних хімічних речовин. Вона добре протистояла механічному зносові, не боялась вологи і на довершення всього була чудовим ізолятором електричного струму.

Так народився новий матеріал, названий на честь його творця «бакелітом» (рис. 4 — кольорова таблиця на стор. 657). А разом з ним з'явилась і нова галузь промисловості — індустрія пластиків і пластичних мас.

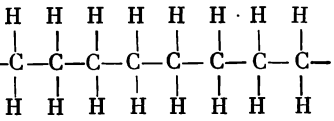
Послідовникам Бекеланда дуже швидко вдалося створити нові, не менш цікаві і корисні матеріали приблизно такого ж типу. Нагріваючи під тиском формальдегід, а замість фенолу сечовину або анілін, хіміки добули ряд нових пластмас.

Чого тільки не можна було виготувати з цих перших промислових полімерів, синтезованих, так би мовити, навпомацки, чисто дослідним шляхом! Законів, що керують їх утворенням і поведінкою, ніхто з перших дослідників не відкрив, та й не намагався цього зробити. По суті справи їм було ніколи. Нові вироби знайшли великий попит, фабриканти вимагали тільки однієї відповіді — «як», а не «чому».

Але без «чому» не можна було створювати нові, ще досконаліші матеріали, поліпшувати якість продукції, зменшувати її вартість, спрощувати виробничі процеси. Хоч-не-хоч довелося по-справжньому взятись до дослідження полімерів. І результати незабаром виявились.

СЕКРЕТ МІЦНОСТІ

Чому саме молекули органічних речовин намагаються з'єднатись у довгі ланцюжки, що включають у себе десятки і сотні тисяч молекул-мономерів? Причина полягає у винятковій міцності валентних зв'язків атомів вуглецю. Візьмемо ланцюжок поліетилену:



Ці ланки міцно «зшиті» між собою валентними зв'язками вуглецю. В свою чергу метиленові ланки двох сусідніх молекул теж притягаються одна до одної, але досить слабо: для того щоб розірвати хімічний, валентний зв'язок між двома вуглецевими атомами, потрібно затратити приблизно у 160 раз більше енергії, ніж для того, щоб перемістити одну відносно одної дві метиленові ланки. Тому відірвати одну від одної звичайні, малі молекули, наприклад, розплавити речовину, яку вони утворюють, або просто роз'єднати їх механічним шляхом далеко легше, ніж розірвати саму молекулу.

А ось у гігантській молекулі все буває навпаки. Адже щоб перемістити дві такі молекули одну відносно іншої, потрібно енергію зв'язку двох метиленових ланок помножити на загальну кількість метиленових ланок у всьому ланцюжку полімеру! А їх може бути кілька десятків тисяч. У цьому випадку стає далеко легше розірвати саму молекулу, ніж відірвати дві молекули одну від одної (докладніше про причини міцності пластмас і інших високомолекулярних сполук див. статтю «Молекулярна будова речовини»).

Вище мова йшла про одну, окремо взяту гігантську молекулу. Але в будь-якій, навіть мізерно малій, кількості речовини їх силасиленна. І від того, як вони розташовуються одна відносно одної залежать і властивості речовини. Ланцюжки можуть розташовуватись прямолінійними паралельними пучками, на зразок проводів у телефонному кабелі. Тоді речовина набуває властивості міцних, еластичних волокон або гнучкого твердого тіла. Коли ж молекули згортаються в клубки, речовина набуває здатності дуже розтягуватись, подібно до всім добре відомого каучуку. Зовнішні сили, діючи на нього, розтягають нарізно, розпрямляють перевиті у хаотичному безладді клубки гігантських молекул каучуку. Але як тільки зовнішні сили зникають, молекули знову скручуються в клубки і каучуковий виріб з силою повертається до своєї попередньої форми.

Уявіть собі клубок із відрізків витого стального дроту. Якщо до нього підвісити важок, клубок розтягнеться. Якщо важок зняти, клубок знову стиснеться.

Можна сказати, що високомолекулярні сполуки можуть вдало поєднувати в собі пружність, властиву газоподібним речовинам, текучість, теплове розширення і стисливість, властиві рідинам, і опірність будь-якій зміні їх форми, характерну для твердих тіл.

У каучуках, пластмасах, клеях дуже різноманітно виявляються незвичайні і несподівані сполучення фізичних властивостей. Вони можуть бути тверді і м'які, крихкі і міцні, пружні і гнучкі, схожі на шкіру чи на гуму.

Деякі полімери здатні текти, як рідини, і водночас мають величезну в'язкість, у мільйон раз більшу, ніж найв'язкіші речовини, наприклад масла. При повільному механічному впливі на них такі полімери страшенно податливі — легко деформуються і немовби течуть. При швидкій взаємодії вони чинять опір, як найбільш пружна гума, а при дуже швидкому впливі поводять себе вже як крихке тверде тіло.

ЯК УТВОРЮЮТЬСЯ МОЛЕКУЛИ-ГІГАНТИ

Одна справа розгадати, як побудований природний полімер, а інша — відтворити його або схожий на нього полімер штучним шляхом, тобто «скувати» ланки, з яких він складається, у довгий ланцюжок. Як і з допомогою чого можна здійснити таке «чаклування»?

Хімік, що збирається відтворити або створити заново гігантську молекулу, чимось нагадує будівника, який задумав побудувати нову споруду. При цьому замість окремих цеглин у розпорядженні будівника можуть бути

крупні блоки різної величини і форми. У хіміка, щоправда, ці блоки невидимі: розмір їх неймовірно малий.

Найпростіші і найзручніші ланки для створення ланцюжків — мономери, що мають форму гілочки з двох і більше вуглецевих атомів з виступаючими по боках атомами водню, з умовою, що всередині молекули є подвійні або потрійні зв'язки. Атоми в молекулі мономеру можуть розташовуватись і у вигляді кілець. Тоді подвійні зв'язки можуть бути не обов'язковими.

Мономерів існує величезна кількість, і наш «архітектор»-хімік може мати в своєму розпорядженні більше число сортів будівельних цеглин і блоків, ніж архітектор-будівник.

Молекули мономерів показано на рис. 5 (кольорова таблиця на стор. 657). Найпростіший з них — газ етилен. Багато інших важливих мономерів являють собою той самий етилен, в якому один з атомів водню заміщений на той чи інший радикал.

Але вибором мономерів планування «архітектури» майбутніх молекул-гігантів не обмежується. Молекули етилену, в якому б порядку їх не сполучали одну з одною, дають полімер, що відрізняється від мономеру тільки своєю величезною довжиною. Така структура, загалом кажучи, особливо сприятлива для добування волокнистих речовин.

Картина значно ускладнюється, коли на місце одиничного водневого атома збоку ланцюжка приєднана ціла група атомів, як, наприклад, у пропілену. Ланцюжок полімеру, «зібраного» з таких мономерів, може набути вже трьох різних видів: мономери сполучені як попало, і їх бічні групи «дивляться» в будь-які боки, бічні групи розташовані всі по один бік ланцюжка полімеру (такі полімери називаються і з о т а к т и ч н и м и); бічні групи розташовуються по обох боках ланцюжка, але в якомусь певному порядку (рис. 6 — кольорова таблиця на стор. 657).

Тепер неважко уявити собі, яку величезну кількість варіантів ланцюжків можна скласти, маючи в своєму розпорядженні такі великі можливості комбінувати розташування мономерів у ланцюжку полімеру!

Ланцюжки, в яких усі бічні групи мономерів спрямовані в один бік («ізо»), легко розміщуються паралельно один одному і утворюють частково кристалічну структуру. А ланцюжки з безладним розміщенням бічних груп характерніші для аморфних (склоподібних) структур речовини. Блоки різних полімерів в свою чергу теж можуть сполучатись один з одним у ланцюжок, подібно до мономерів. Нарешті, як бічні паростки на місці груп атомів мономерів можуть бути цілі полімери.

І кожна така зміна в структурі полімеру означає якусь певну зміну в механічних або інших його властивостях.

«ШВЕЙНА ФАБРИКА» ДЛЯ ГІГАНТСЬКИХ МОЛЕКУЛ

Молекули мономерів самі по собі ніяк не сполучаються. Адже у них немає ні рук, ні гачків, ні магнітиків, ні електричних зарядів, з допомогою яких вони могли б самовільно сполучатися одна з одною.

Отже, потрібно їх примусити сполучатись, «вкрутити» у кінці молекул по «гачечку». Для цього існують два основні способи: п о л і к о н д е н с а ц і я і п о л і м е р и з а ц і я. Обидва вони вимагають звичайно нагрівання, причому часто доводиться застосовувати високі тиски і каталізатори-ініціатори.

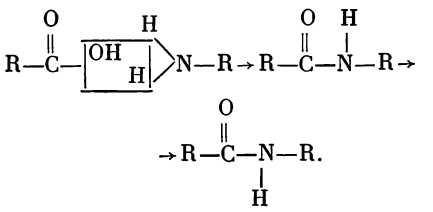
В результаті такого об'єднаного енергійного впливу мономери або групи мономерів зазнають перебудови. Атоми їх, розташовані на кінцях молекул вихідних речовин, набувають «гачечків», тобто набувають здатності зв'язуватись, зчеплюватись один з одним, як зчеплюється поїзд на сортувальній станції: вагон за вагоном (рис. 5 — кольорова таблиця на стор. 657).

ПОЛІКОНДЕНСАЦІЯ

Процес поліконденсації проходить у вигляді складної хімічної реакції з виділенням як своєрідних «відходів» деяких низькомолекулярних речовин — звичайно води, аміаку і т. д. Саме цим поліконденсація відрізняється від полімеризації, при якій вихідний продукт перетворюється у кінцевий цілком, без усяких «відходів».

«Зчеплення» при поліконденсації відбувається коштом відщеплення рухомих атомів або груп атомів з функціональних груп, що входять в молекулу. До числа таких груп в органічних молекулах належать аміногрупа (NH_2), від якої може відщеплюватись атом водню, і карбоксильна група (COOH), від якої порівняно легко відривається гідроксильна група OH. Це відбувається, коли молекула з карбоксильною групою зустрічається з молекулою, що містить аміногрупу, тому що атом водню, який

відривається від аміногрупи, у цьому випадку дістає змогу сполучитись з гідроксильною групою у міцну молекулу води:



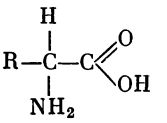
При цьому у першої молекули звільняється зв'язок при атомі вуглецю, а у другої — при атомі азоту. Через ці зв'язки молекули і змикаються одна з одною.

Якщо в кожній молекулі є лише по одній функціональній групі, на цьому все і закінчується. Такий тип хімічних реакцій ми називаємо конденсацією. Якщо ж у молекулах міститься не менш як по дві функціональні групи, з'являється можливість приєднання до утвореної «подвійної» молекули нових і нових ланок коштом введення в дію нових і нових функціональних груп, інакше кажучи, можливість безмежного росту молекули.

Отже, необхідною (проте недостатньою) передумовою для реакції поліконденсації є наявність у вихідних молекулах не менш як по дві функціональні групи, такі, як аміногрупа чи карбоксильна група. Зауважимо, до речі, що ці ж групи використовують при побудові молекул барвників для тієї самої, по суті, мети — щоб утворити зчеплення між молекулою барвника і забарвлюваним волокном (див. стор. 683). Таку ж роль і при фарбуванні волокон барвниками, і при реакціях поліконденсації можуть відігравати і інші функціональні групи, наприклад група ОН.

Припустимо, задумали здійснити поліконденсацію двох речовин. Молекули однієї з них мають на обох своїх кінцях основну аміногрупу NH_2, другої — кислотну групу карбоксил COOH, хоч молекулам не обов'язково мати на обох своїх кінцях однакові групи: з таким же успіхом вони можуть бути і різними. Молекули реагуватимуть одна з одною тільки одним способом: аміногрупа одного мономеру з карбоксилом другого. При цій реакції виділиться вода.

Так, наприклад, утворюється полімер синтетичного волокна типу найлону. Як «креслення» для нього взято було структуру природних полімерів — шерсті і шовку, які утворені шляхом саме такого зчеплення. Тільки у шерсті і шовку аміногрупа і карбоксил містяться не в різних вихідних молекулах, а в одній і тій же молекулі — молекулі амінокислоти:



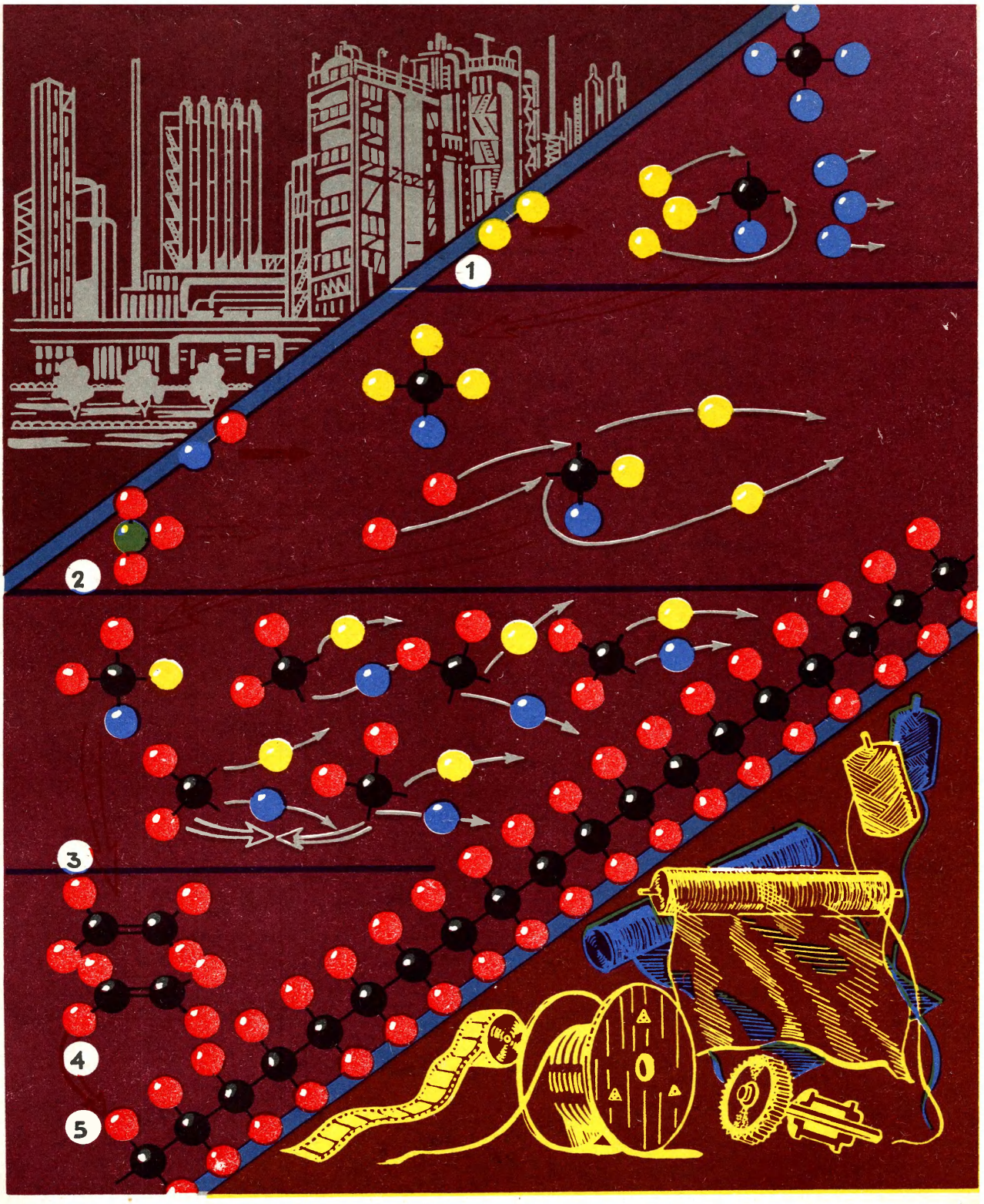
Аміногрупа — на одному кінці, карбоксил — на другому. Не дивно, що найлонове волокно і за зовнішнім виглядом, і за властивостями дуже схоже на шовк.

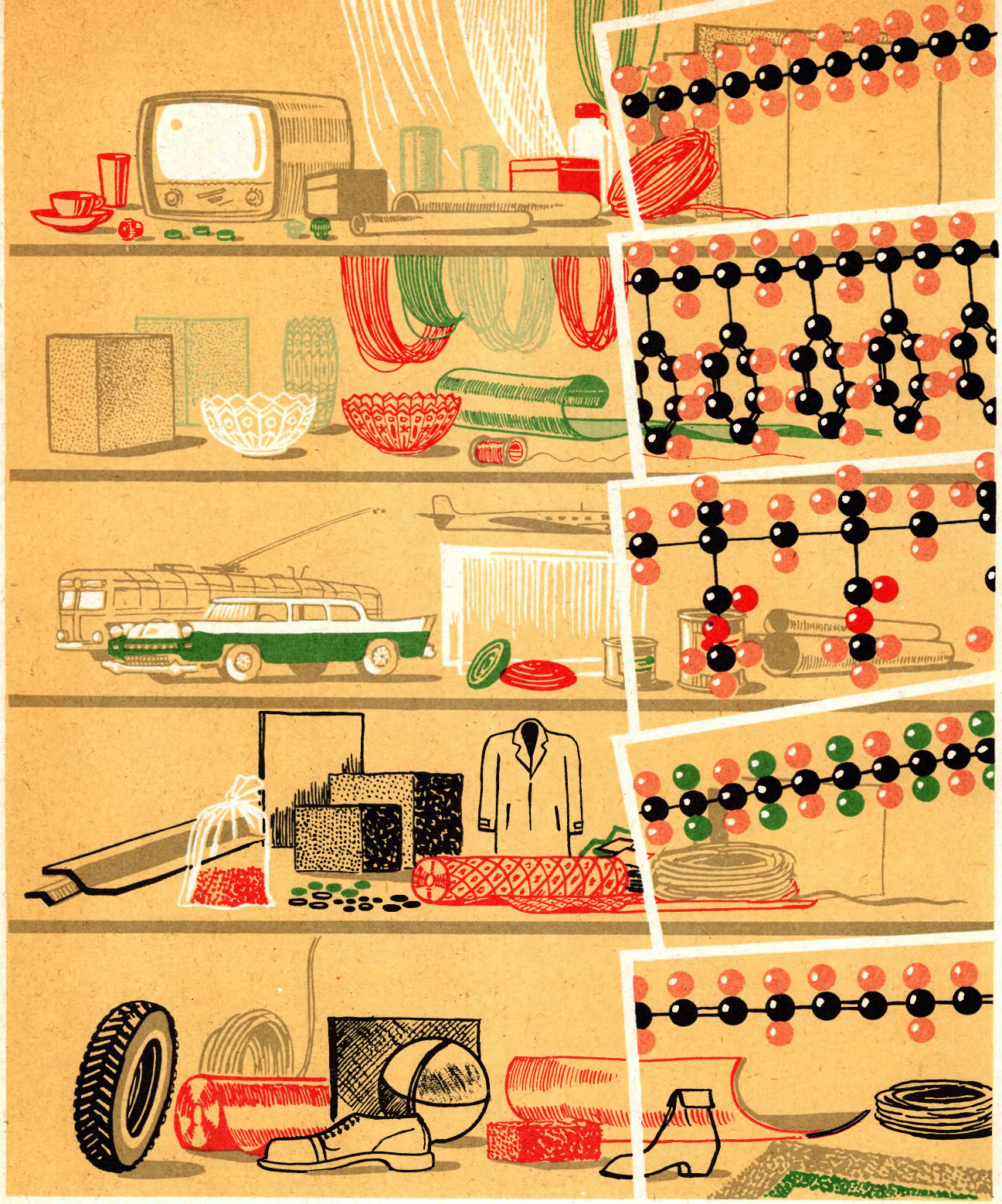
Процес поліконденсації має ту хибу, що він не дає змоги «виростити» дуже великі молекули.

На щастя, для створення ряду полімерів (наприклад того ж найлону) цілком досить молекули, складеної з 10—20 тисяч мономерів.

Метод поліконденсації дозволяє добувати такі дуже важливі речовини, як ф е н о л о ф о р м а л ь д е г і д н і, к а р б а м і д н і і м е л а м і н о - ф о р м а л ь д е г і д н і с м о л и.

Таблиця 45. Добування фторопласту («тефлону»). Основною сировиною для виробництва фторопласту є газ метан, молекула якого складається з одного атома вуглецю (чорний кружечок) і чотирьох атомів водню (голубі кружечки). Щоб добувана речовина мала високу теплостійкість і стійкість проти дії найсильніших хімічних реактивів, в молекулі метану атоми водню потрібно замінити атомами фтору. Але зразу це зробити не можна. Спочатку метан піддають хлоруванню. При цьому з молекули метану «вибиваються» три атоми водню, а на їх місця стають атоми хлору (жовті кружечки), в результаті чого утворюється молекула хлороформу (1). Хлороформ піддають дії речовин, що містять фтор, наприклад фтористого водню, який є ще енергійнішим реагентом, ніж хлор. У молекулі хлороформу при цьому два атоми хлору заміщуються двома атомами фтору. Утворюється молекула дифторхлорметану, що складається з атома вуглецю, двох атомів фтору і по одному атому водню і хлору (2). Тепер можна приступити до створення тетрафторетилену — вихідного мономеру, потрібного для виробництва гігантської молекули фторопласту. Для цього дифторхлорметан нагрівають до високої температури, в результаті чого його молекули втрачають відносно слабо зв'язані з ними атоми хлору і водню (3). Оскільки молекул, що утворились, кожний з яких складається з одного атома вуглецю і двох атомів фтору, з величезною енергією сполучаються один з одним, утворюючи молекулу тетрафторетилену (4). Процес полімеризації цього мономеру провадиться при підвищеній температурі і під тиском з використанням як каталізатора перекису водню, в результаті чого утворюється фторопласт (5)— нова штучна пластична речовина, яка має цілий ряд чудових властивостей.


1
2
3
4
5



Вони вживаються як клеї або зв'язуючі речовини при виробництві фанери, електроізоляційних виробів, пінопластів, матеріалів, в які входить тирса, і т. д.

Реакція двоосновних кислот з діамінами — $R(NH_2)_2$ або гліколями — $R(OH)_2$ дає дуже важливі вихідні полімери — поліаміди і поліефіри. З цих полімерів після дальшої переробки виготовляють винятково міцні волокна: анід, найлон і лавсан.

З усіх цих речовин виходять чудові плівки, які майже не пропускають газу і є міцнішими, ніж алюмінієва фольга однакової з ними товщини. Тому їх широко вживають для ізоляції електричних проводів, упаковування їжі і товарів, виготовлення балонів і навіть для склін'я рам у парниках.

З вугільної кислоти і деяких фенолів добувають поліефіри — дуже теплостійкі полімери (полікарбонати). Їх використовують у виробництві міцних і водночас теплостійких (до 250°С) плівок, волокон і пластмас.

ПОЛІМЕРИЗАЦІЯ

Процес полімеризації дозволяє добувати гігантські молекули практично будь-якої довжини — ланцюжки у сотні тисяч і навіть мільйони складових ланок. Порівняно з поліконденсацією цей процес простіший, але ним важче керувати. Якщо в поліконденсації беруть участь молекули, на кінцях яких вже заздалегідь є «гачечки», з допомогою яких вони сполучаються в ланцюжки полімерів, то в процесі полімеризації ці «гачечки» створюються у той момент, коли кожний мономер стає на своє місце в ланцюжку.

Досягається це різними шляхами, але всі вони вимагають наявності ініціатора. На відміну від звичайного процесу каталізу при полімеризації ініціатор витрачається.

Як ініціатор застосовують вільні радикали — осколки крупніших молекул, зруйнованих в результаті нагрівання. Такий вільний радикал, маючи на орбіті одного з атомів, з яких він складається, зайвий електрон, хімічно дуже активний і здатний міцно сполучатися з деякими мономерами. У кінцевого атома мономерів завдяки цьому з'являється свій вільний електрон, вони самі стають вільними радикалами і в свою чергу прилучають дальші мономери.

Мономери один за одним нанизуються в ланцюжок полімеру, а вільний (непарний) електрон, прилучивши до ланцюжка черговий мономер, немовби переходить на його кінець, щоб прилучити дальший, і т. д. (рис. 8 — кольорова таблиця на стор. 658).

Таким шляхом створюються поліетилен, полістирол, поліхлорвініл. Їх гігантські молекули можуть бути лінійними, можуть мати бічні відгалуження. Останнє відбувається в тому випадку, коли вільний радикал починає прилучатись не до кінця довгого ланцюжка полімеру, а десь збоку. Це буває, якщо процес полімеризації провадиться при високій температурі. Такої будови, наприклад, набуває поліетилен, коли він полімеризується при тиску в 1000 *атм* і температурі 200—300°.

У наше завдання не входить виклад тут усіх можливих способів полімеризації або тонкощів використання найрізноманітніших каталізаторів і ініціаторів. Ми хотіли тільки показати «архітектурний бік» будови полімерів і те, на що повинен зважати хімік, коли він складає план добування нової штучної речовини. У такій речовині іноді повинні поєднуватись найбільш незвичайні, а іноді й неймовірні, але дуже потрібні людині властивості, яких ніколи ще не створювала природа.

Ми вже згадували про те, що не всі мономери зразу, без попередньої перебудови, придатні для створення потрібних полімерів. Тому найчастіше їх доводиться видозмінювати, перебудовувати і тільки після цього приступати до «зшивання» у довгі ланцюжки.

Шляхом полімеризації газу етилену добувають тверду речовину — поліетилен. З нього виготовляють велику кількість різноманітних пластичних мас і плівок, що відзначаються хімічною стійкістю, вологонепроникністю, а також чудовими електроізоляційними властивостями.

Замінивши в етилені атоми водню іншими атомами або групами, можна дістати мономери, з яких, як виявляється, значно легше створювати нові полімери, ніж із самого етилену. Такий, наприклад, полівінілхлорид —

Таблиця 46. Речі, зроблені з різних синтетичних матеріалів. Справа показано частини молекул таких речовин: поліетилену, полістиролу, поліметилметакрилату, полівініліденхлориду, синтетичного каучуку (чорними кружечками позначено атоми вуглецю, коричневими — водню, червоними — кисню, зеленими —хлору).

дуже добрий матеріал для ізоляції електричних проводів, для хімічно стійких прокладок, штучної шкіри і легких пінопластів.

Вводячи в етилен на місце атомів водню атоми фтору, добувають фторопласти. Вони відзначаються винятковою теплостійкістю (до 300°) і хімічною стійкістю, яку не можна порівняти ні з якими іншими речовинами. Поліметилметакрилат (відомий усім під назвою плексиглас) вживають для виробництва небиткого скла, прозорої броні. Він поєднує у собі ідеальну прозорість кращих сортів силікатного скла з незвичайною легкістю і пружністю сталі. Полістирол — найкращий з відомих діелектриків.

ЯК ДОБУВАЮТЬ ФТОРОПЛАСТ

Щоб уяснити, як всі ці «таємниці» відбуваються в дійсності, розглянемо послідовність створення нової штучної пластичної маси — фторопласту (тефлону). Тут ми свідомо вибрали один із найскладніших і хитромудрих процесів з тим, щоб наочніше показати методи і прийоми, які застосовує сучасна хімія високомолекулярних сполук. Адже у цьому випадку хіміки заздалегідь поставили собі мету добути речовину, яка мала б набір найнезвичайніших якостей, яких взагалі не буває в навколишній природі (див. кольорову таблицю на стор. 660).

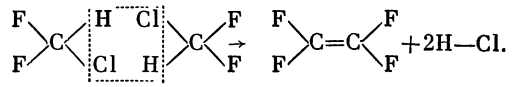
Для синтезу фторопластів використовують газ метан. Він у достатку є в природі. Його також добувають при переробці сирої нафти у різні види палива. Молекула цього газу складається з одного атома вуглецю, який удержує коло себе чотири атоми водню (CH_4).

Для того щоб кінцевий продукт був теплостійкий, стійкий проти дії найсильніших хімічних реактивів і мав багато інших позитивних якостей, молекули метану потрібно перебудувати, перекроїти, зшити у довгі ланцюжки і провести ще ряд складних операцій.

Насамперед з молекули метану потрібно видалити атоми водню і замінити їх атомами фтору. Але зразу зробити це не можна. Спочатку метан піддають дії такого сильного реагенту, як хлор. В результаті хімічної реакції з атома метану видаляються три атоми водню і на їх місця стають три атоми хлору. Один атом водню в молекулі зберігається. Це конче потрібно, щоб могли відбутися дальші перетворення молекули. З молекули метану утворилась молекула хлороформу ($CHCl_3$). Далі хлороформ піддають дії фтористого водню. Тепер з молекули хлороформу видаляються два атоми хлору, і на їх місця стають два атоми фтору. В результаті ми добуваємо молекулу речовини, що називається дифторхлорметаном (CHF_2Cl). Вона містить два атоми фтору, один хлору, один вуглецю і один водню.

Отже, атоми фтору успішно зайняли в молекулі етилену місця атомів водню. Тепер вже можна приступити до створення тетрафторетилену — вихідного мономеру, потрібного для побудови задуманого полімеру.

Настав час видалити з молекули «допоміжні» атоми хлору і водню, які тяжіють один до одного і намагаються з'єднатись у молекулу HCl. Це може статися, проте, тільки коштом взаємодії двох молекул дифторхлорметану, бо інакше в молекулі CHF_2Cl залишились би ненасичені валентності в атома вуглецю. Взаємодія ж двох молекул відбувається так:



Ось у молекулі і з'явився подвійний зв'язок.

Заготовку вихідної речовини закінчено, і тепер вже можна приступити до «зшивання» добутих мономерів у полімер — гігантську ланцюгову молекулу фторопласту — політетрафторетилену. Процес «зшивання» (полімеризація) провадиться при високих температурах і тисках, а для його прискорення в реактор вводять ініціатор, наприклад деякі перекисні сполуки (перекис водню та ін.).

Нарешті, процес створення фторопласту закінчений. Він має вигляд білої твердої маси, яка зберігає свої властивості в межах температур від —6 до +350°, а це незвичайні властивості.

На фторопласт не діють ні луги, ні кислоти, його не розчиняє навіть так звана «царська водка» — суміш соляної і азотної кислот, — яка розчиняє навіть благородні метали: золото і платину. Тому фторопласт, або, як його називають, «органічна платина», — це ідеальний матеріал для будь-якого хімічного посуду, труб і апаратури. Крім того, сьогодні це найбільш ковзька речовина у світі. Недбало покладена на стіл чи стілець плівка або тканина з фторопласту може буквально «втекти» або «стекти» на підлогу. Якщо ковзьку поверхню лиж підбити такою плівкою, то швидкість спуску з гори різко збільшується. Фторопластові підшипники в ряді приладів і машин

можуть працювати без змащування! Фторопласт — чудовий діелектрик, який має до того ж винятково високу теплостійкість. Захищені ним електричні проводи і обмотки можуть без шкоди для себе витримувати нагрівання до 400°С — температури, при якій плавиться свинець.

СКЛО, ШКІРА ЧИ ГУМА?

Усі полімери можна поділити на дві великі групи: цілком аморфні (однорідні) полімери, схожі, наприклад, на скло, і полімери з частково кристалічною (впорядкованою) структурою.

Спочатку спинимось на групі аморфних полімерів.

У них молекулярні ланцюжки переплетені один з одним у найбільш химерних і безладних комбінаціях. При такому внутрішньому структурному безладді аморфні полімери нагадують скоріше рідини, ніж тверді тіла.

Аморфні полімери використовують для добування найрізноманітніших речовин: від гуми і штучної шкіри до так званого органічного скла, що застосовується в літаках. Інакше кажучи, вони можуть мати властивості скла, гуми або шкіри. Але ця їх різниця існує тільки при звичайних (кімнатних) температурах. Кожний з аморфних полімерів може змінити одну з своїх властивостей на іншу залежно від температури. Гума, якщо її заморозити до температури нижче —80°, розлітається при ударі, як скло. Якщо склоподібну пластмасу нагріти, вона, навпаки, стає спочатку м'якою і гнучкою, як шкіра, а потім набуває властивостей гуми. Якщо продовжити нагрівання, вона стає рідкотягучою.

Усі ці перетворення проходять звичайно в інтервалі температур, що не перевищують 40°. Кожний полімер має свою перехідну температуру, при якій він втрачає властивості скла і набуває властивостей шкіри. Вона залежить від будови молекули і від енергії, яка удержує вкупі сукупність великих молекул. Наприклад, гума з крихкої (замороженої) речовини перетворюється в еластичну вже при порівняно низькій температурі, тому що її молекули удержуються одна коло одної досить слабо.

Полімери, що складаються з більш «твердих» (тобто міцніше зв'язаних одна з одною) молекул, втрачають свій склоподібний стан лише при порівняно високій температурі.

У аморфного полімеру з підвищенням температури молекулярні ланцюжки приходять у наростаючий броунівський рух. Спочатку в коливальний рух приходять найкоротші ділянки—довжиною в кілька атомів, — а потім і довші. Розмах такого руху обмежується тільки перемичками, якими ланцюжки можуть стягуватись між собою, та численними вузлами і переплетеннями заплутаного клубка молекул.

При відносно низькій температурі, коли у швидкому коливальному русі знаходяться тільки малесенькі ділянки ланцюжків, полімер стає схожим на шкіру — еластичним, гнучким. Чим вища температура, тим він стає менш міцним, податливішим. Він дедалі більше набуває властивостей гуми. Такий стан відповідає особливо енергійному хаотичному рухові всіх ділянок молекул в усіх мислимих напрямах. При цьому полімер усе ще зберігає свою форму.

Нарешті, наступає температура, при якій аморфний полімер втрачає свою форму і починає текти, як дуже в'язка рідина. Але рідкий полімер — не звичайна рідина. Його текучість визначається не здатністю однієї молекули ковзати вздовж іншої, як у звичайних рідин, а здатністю ковзати всієї сукупності окремих ланок довгих молекулярних ланцюжків. Отже, в'язкість полімеру залежить головним чином від довжини його молекул, тобто від ступеня полімеризації.

Полімер у такому стані значно легше перетворювати у готовий виріб — шляхом пресування або видавлювання крізь найтонші отвори. Утворюються довгі нитки, з яких роблять потім штучне волокно. Так поводять себе високомолекулярні речовини з лінійними або розгалуженими молекулами — *термопластичні смоли* (рис. 9 — кольорова таблиця на стор. 658).

Інакше поводять себе *термореактивні*, що тверднуть при нагріванні *смоли*, з молекулами яких при нагріванні відбуваються хімічні зміни (рис. 9,*а* — кольорова таблиця на стор. 658). Рідкотекучість їх усувається утворенням між сусідніми молекулами численних зв'язків. Саме цю роль виконують атоми сірки у вулканізованій (нагрітій разом із сіркою) гумі (рис. 2 — кольорова таблиця на стор. 658).

Вибити атоми водню з ланок довгих молекул каучуку і інших полімерів і дати можливість цим ланцюжкам сполучитись між собою з допомогою прямого зв'язку атомів вуглецю однієї молекули з атомами вуглецю інших молекул можна за допомогою іонізуючого випромінювання. З успіхом можна використати гамма-

проміння, що має велику енергію, потік швидких електронів, протонів, або позитивних іонів, а в ряді випадків ультрафіолетове проміння. При цьому полімер теж втрачає властивість текучості.

Частіше розташування таких зв'язків дозволяє полімерові зберігати склоподібний стан аж до температури, при якій починається його розклад чи горіння.

До цієї групи полімерів належить добре відомий б а к е л і т.

До другої групи полімерів належать такі речовини, структура яких частково має властивості кристалічних тіл. Ці властивості припадають на ті ділянки полімеру, де всі короткі відрізки великої кількості довгих молекул улягліись паралельно одна одній. Ці острівці порядку в морі безладдя — малесенькі кристалики довжиною не більш як одна мільйонна частка сантиметра. Але їх можна виявити з допомогою рентгенівського проміння або навіть побачити неозброєним оком, якщо розглядати полімер у промінні поляризованого світла. Інші ланки довгої молекули, розташовані між кристаликами, тісно переплетені з такими ж ланками інших молекул. Вони утворюють аморфні ділянки полімеру, що служать своєрідним клеєм, який скріплює всі ці дрібні кристалики в деяку подобу кристалічного тіла.

Поведінка частково кристалічних полімерів значно складніша, ніж цілком аморфних полімерів, і вивчена ще дуже мало. Вони можуть бути і в склоподібному стані, який втрачають при деякій певній температурі. Ця зміна означає, що в аморфних частинах структури зв'язані одна з одною ланки великих молекул звільнились одна від одної. Проте, на відміну від цілком аморфних, частково кристалічні полімери не набувають властивостей гуми чи шкіри. Вони втрачають крихкість, але не твердість. Закристалізовані ділянки усувають тенденцію полімеру до деформації.

Твердість цих полімерів залежить безпосередньо від кількості кристалічних ділянок. Але і наявність аморфних ділянок виявляється дуже корисною. Аморфні ділянки надають виробам з полімерів достатньої пружності, що особливо корисно в тих випадках, коли ці вироби зазнають ударних навантажень.

Кристалічна структура найчастіше зустрічається у полімерів, ланцюгові молекули яких мають відносно просту і симетричну структуру.

Молекули полімерів, що зустрічаються в природі (шерсті, шовку, бавовни), завжди певним способом орієнтовані і тому мають високу міцність. Така орієнтація, якщо її вдається здійснити у штучних волокнах, надає останнім міцності сталі.

Орієнтація молекул полімерів одночасно в двох напрямах дозволяє діставати дуже міцні плівки. Зокрема, висока міцність гуми, яка при звичайних температурах має аморфну структуру, утворюється коштом того, що в розтягнутому стані вона набуває властивостей кристалічної структури.

Розглянуті вище закономірності в поведінці високомолекулярних полімерів становлять лише невелику частину того, що потрібно про них знати для повного оволодіння цією надзвичайно складною галуззю сучасної органічної хімії. Вчені ще мають розв'язати дуже багато проблем.

Проте досягнуті результати вже відкрили надзвичайно важливі перспективи для створення нових матеріалів і виробів з них. Для цієї мети в розпорядженні хіміків є не менш як 40 видів органічних мономерів, що добуваються головним чином з вугілля, нафти і природних газів — сировини, яку ми маємо в нашому розпорядженні у величезній кількості.

Може здатися, що це не так уже багато — 40 видів. Але з цих «цеглинок» хімія полімерів може добути нескінченну кількість комбінованих речовин — синтетичних волокон, смол і пластичних мас. І кожний день приносить нам усе нові і нові відкриття в цій галузі, нові матеріали. Згадаємо тільки деякі з них.

Відомо, що гума, виготовлена з натурального каучуку, має цілий ряд хиб. Вона набрякає у бензині, боїться масла, руйнується при нагріванні понад 120°. А тепер вже є не один, а досить багато сортів штучних каучуків, стійких проти дії бензину, масла, глибокого холоду і температур понад 300°. П о л і у р е т а н о в и й к а у ч у к, хімічно зовсім не схожий на природний, настільки міцний, що виготовлені з нього шини можуть пережити самий автомобіль.

Колись людей дивувала надзвичайна міцність шовкового волокна. Міцність капрону вдвоє перевищує міцність шовку і в шість раз більша, ніж у шерсті. На розрив вона дорівнює міцності деяких сортів сталі.

Відомі сорти полімерних плівок, які витримують до 5 млн. подвійних перегинів. Сучасна хімія дає нам п о л і а м і д н і штучні волокна, які на стирання у 20 раз міцніші, ніж шерсть, і в 10 раз — ніж бавовна.

Поряд з чисто хімічними способами добування полімерів в арсеналі вчених є методи і засоби для того, щоб вести полімеризацію, застосовуючи високі і надвисокі, низькі і наднизькі температури і тиски, нові каталізатори, джерела різноманітних опромінювань і т. д.

Але це ще не все. Знаючи закони утворення полімерів, можна змінювати властивості високомолекулярних полімерів. Припустимо, що в полімер (рис. 11, справа — кольорова таблиця на стор. 659), який не має високої температурної стійкості, ввели мономер, що змінив одноманітну структуру полімеру. В результаті утворився так званий високомолекулярний с о п о л і м е р, що має вже високу теплостійкість (рис. 11, зліва). Шляхом такого «зшивання» певної кількості мономерів одного сорту з тим чи іншим числом мономерів другого сорту можна добути різні сополімери. Останні часто мають дуже високу опірність проти дії різних розчинників, високу міцність і інші цінні властивості.

У галузі створення високополімерів знайшли застосування і методи прищеплення, які звичайно зустрічаються тільки в садівництві (рис. 12 — кольорова таблиця на стор. 659). При цьому полімеризація мономеру, що входить як ланка у ланцюжок основного полімеру, провадиться шляхом прилучення мономеру, що є крайньою ланкою іншої великої молекули. З такої молекули-мономеру тим чи іншим способом вивирають атоми, звичайно атоми водню. Тоді на звільнених місцях молекули-гіганта виростає бічний ланцюг мономеру, що полімеризується у гілочку. Прямолінійна гігантська молекула починає розгалужуватись, як дерево. Але галузки ці мають особливий склад, і весь утворений таким шляхом полімер набуває зовсім нових властивостей.

Так можна «прищепити» п о л і с т и р о л до целюлози. Остання жадібно вбирає воду, а полістирол відштовхує її. В результаті матеріали, виготовлені з такої целюлози, набувають властивості відштовхувати воду. Це дуже важливо для тканин, з яких виготовляють складані човни, намети, плащі і т. д.

Скільки прикростей і неприємностей спричиняє вигляд пом'ятого одягу, погано випрасуваної білизни, скільки корисного часу забирає прасування. І ось тепер, «прищеплюючи» молекули а к р и л н і т р и л у до молекул целюлози, можна добути тканини, що не мнуться і не потребують прасування після прання.

І У ВОГНІ НЕ ГОРИТЬ...

Дія деяких науково-фантастичних повістей розгортається на дуже гарячих планетах, де температура атмосфери досягає кількох сот градусів, течуть річки із розплавленого каменю, а живі тварини, що населюють їх, без усякої для себе шкоди витримують таку спеку.

Чи є частка істини в таких неправдоподібних оповіданнях? Так могло б, мабуть, бути, якби до складу «живої матерії» ввійшли атоми кремнію. Адже все, що в природі зв'язано з цим елементом, відзначається високою температурною стійкістю.

Звичайно, створити живу матерію на базі кремнію ще нікому не вдавалось, і до цього, очевидно, ще дуже і дуже далеко. Але впровадити в органічні полімери атоми кремнію вдалося ще років 20 тому. Тоді вперше добуто було полімери-гібриди водневих сполук вуглецю і кисневих сполук кремнію, тобто органічних і неорганічних полімерів.

Розвиток авіаційної, автомобільної, оборонної та інших галузей промисловості створив потребу в електричних двигунах, які давали б максимальну потужність при дуже невеликих розмірах. Цього можна досягти тільки при різкому перевантаженні двигунів, що неминуче приводить до відповідного збільшення їх робочих температур. Щоб двигуни витримали таку високу температуру, потрібно було добути цілком нові ізоляційні матеріали, здатні вистояти при подвоєному і навіть потроєному перегріві. Добути їх зразу тоді не вдалось.

Замість них в руках хіміків опинились тільки рідини, що містять кремній. А втім, знайшлося застосування і для них: їх почали вживати як мастила, що витримують високу температуру.

Приблизно в 1945 р. було добуто вже перші кремнієвмісні каучуки, а потім і гуму.

На відміну від молекул органічних речовин, в яких атоми вуглецю сполучаються між собою прямими валентними зв'язками, в к р е м н і й о р г а н і ч н и х полімерах атоми кремнію всередині мономеру сполучені між собою через атоми кисню (рис. 13 — кольорова таблиця на стор. 659). Внаслідок цього такі сполуки і називають с и л о к с а н а м и (від латинських слів с и л і ц і у м — кремній і о к с и г е н і у м — кисень).

Силоксани, так само як і органічні мономери, здатні сполучатися у довгі ланцюжки бічними відгалуженнями. В'язкість рідких полімерів

збільшується в міру збільшення довжини молекул. При цьому вони перетворюються у в'язкі смоли, далі в каучуки і, нарешті, в тверді речовини. У тих випадках, коли ланцюжки кремнійорганічних полімерів зв'язані між собою перемичками, вони утворюють об'ємну структуру, що наближається до структури кварцу.

Добувати кремнійорганічні речовини можна кількома шляхами, в тому числі і тими, якими добувають органічні полімери, тобто поліконденсацією і полімеризацією.

І хоч ця галузь хімії високомолекулярних сполук зародилась відносно недавно, вклад її в науку і техніку вже дуже великий і зростає з кожним днем.

Візьмемо кремнійорганічні смоли. Це чудова основа для виробництва різноманітних покриттів, у тому числі для водовідштовхуючих. На їх основі вдалося створити покриття, які, наприклад, захищають бетон і камінь від руйнування. Силоксанові, або силіконові, фарби і лаки дозволяють фарбувати нагрівані предмети (печі, трубопроводи і т. д.), які раніше взагалі не можна було фарбувати, бо будь-які фарби на них розкладались або вигоряли.

Силіконовими смолами просочують тканини із скляного волокна, що використовується для обмоток електричних машин, це дозволяє більш ніж подвоїти робочі температури машин, отже, і електричну потужність, яку вони розвивають чи пропускають.

Особливо чудових якостей набувають гуми, що добуваються на основі кремнійорганічних полімерів з дуже високою молекулярною вагою. Жодна гума, наприклад для автомобільних покришок, виготовлена з природного чи штучного каучуку, не може витримати в робочих умовах зміни температур від —80° до +200°. А деякі сорти силіконової гуми витримують нагрівання до 300°.

Будучи винятково теплостійким, кремнійорганічний каучук погано переносить дію бензину і масла. Але якщо плівки з нього ввести у відповідний органічний мономер (наприклад акрилонітрил) і подіяти на них сильним гамма-випромінюванням, то до кремнійорганічного полімеру можна з успіхом «прищепити» бічні гілочки поліакрилонітрилу, дуже стійкого проти дії бензину і масел. Так добувають теплостійку гуму, стійку також проти дії бензину і масел.

Цікаві галузі застосування кремнійорганічних емульсій. Багато приладів (вентилі, частини насосів і т. д.), через які проходять гарячі і їдкі рідини, потрібно мастити. Жодні масла, жири, тавоти для цього не придатні. А водовідштовхуюча, теплостійка кремнійорганічна емульсія, що міцно удержується на робочій поверхні, чудово справляється з поставленим завданням. Електричний двигун з кремнійорганічною ізоляцією обмотки працює без втрати енергії навіть під водою, тому що ця ізоляція має чудові електроізолюючі властивості.

Кремнійорганічні мастила, якщо нанести їх тонким шаром на стекла літака або автомобіля, тривалий час захищають їх від заливання водою, запотівання, обледеніння. При виливанні рідини з посудини, покритої тонким шаром кремнійорганічного мастила, на стінках не залишається ані краплі рідини. Це дуже важливо для деяких хімічних виробництв і лабораторних експериментів.

Дуже цінні кремнійорганічні речовини в тих випадках, коли потрібно запобігти прилипанню однієї речовини до іншої, причому дія мастила у даному випадку не залежить від того, чи будуть ці речовини в холодному, теплому або гарячому вигляді. Модель не пристане до формовочної суміші у ливарному виробництві, гума — до форм, рідини — до труб, вода — до тканин і т. д.

Дитина, що видуває мильні пузирі, вважає піну однією з позитивних якостей мила. Але існує цілий ряд виробництв, де поява піни — серйозний дефект і навіть може бути небезпечною. Піна — це скупчення в рідині газових бульбашок, утворенню яких сприяють незначні домішки деяких білків, миючих речовин і інших так званих поверхнево-активних речовин. Ці домішки концентруються у вигляді найтонших плівок на межі між повітрям і рідиною. Якщо рідина кипить або перемішується, кількість піни різко збільшується.

Існує багато способів знищення піни: механічні (обертові диски, центрифуги), хімічні (додавання алкоголю, касторки). Але всі вони дорогі, не досить ефективні, а головне—більше перешкоджають утворенню нової піни, ніж ліквідують стару.

І тільки кремнійорганічні речовини радикально усувають ці неприємності, причому потрібна для цього кількість домішки дуже невелика: від однієї до 25 частин на мільйон!

Отакі ті з небагатьох, але дуже цікавих і важливих галузей застосування кремнійорганічних сполук. Але і їх більш ніж досить, щоб уявити собі захоплюючі перспективи, що

відкриваються тут перед наукою і технікою найближчого майбутнього. І якщо коли-небудь людині вдасться, розкривши до кінця таємницю будови молекул живої речовини, створити потім їх у лабораторній пробірці, то слідом за цим, можливо, вдасться створити і таку молекулу, яка, подібно до жар-птиці, житиме у спопеляючому полум'ї.

МАЙБУТНЄ ПОЛІМЕРІВ

Нині хімія високомолекулярних сполук досягла такої стадії, коли вона здатна створювати матеріали з певними, заданими властивостями, «викроєні» і «зшиті» на замовлення.

Але сьогоднішні досягнення хімії полімерів — це тільки перші кроки. Найкрупніший полімер, що використовується тепер у виробництві пластичних мас, має молекулярну вагу близько 2 000 000. Є всі підстави припускати, що, поки друкуються ці рядки, у лабораторіях буде здобуто полімери з ще більшою молекулярною вагою.

Створювані тепер речовини мають високу теплостійкість, що досягає 300°. Але сьогодні цього вже явно мало. На черзі завдання створити ще теплостійкіші речовини, можливо, на основі деяких дуже стійких органічних мономерів.

І, нарешті, вінцем органічної хімії є жива речовина, білок. Адже і тепер вже відомі полімери, які можуть виконувати деякі функції крові тварин. Людині рано чи пізно вдасться наблизитись до тієї дивовижної досконалості, з якою живий організм будує свої гігантські молекули. Але про це мова йтиме в іншій статті.

З ЧОГО РОБЛЯТЬ ОДЯГ

Хто ж не знає, що одяг шиють із тканин! Тканин ми знаємо велику кількість. Одні з них тонкі, мов павутина, інші схожі на рогожку. Одні чорні, як вугілля, інші мають колір небесної блакиті, треті розцвічені химерним узором і милують око тонкістю відтінків.

Але нас цікавитиме не розкраска тканин. Важливо, з чого їх роблять. Адже від цього залежить, чи буде костюм міцним і як потрібно поводитись з одягом, щоб він довше носився. Тканини для одягу роблять із волокон: природних (рослинних і тваринних), штучних і синтетичних.

Волокна рослинного походження можна бачити, наприклад, у льону. Стебло його, після того як полежить на сирій землі, при «тіпанні» легко розпадається на довгі волокнинки. З них прядуть льняні нитки, а потім, переплітаючи їх на ткацьких верстатах, виробляють тканини.

Коробочка бавовнику.

Льняні тканини славляться міцністю. З них виготовляють сорочки, рушники, скатерки, брезенти і т. д.

На півдні нашої Батьківщини вирощують бавовник. Коли закінчується цвітіння цього чагарника і достиглий плід (коробочка) розкривається, неозорі поля немовби вкриваються пухнастим білим покривалом. Насіння бавовнику покрите безліччю білих волокнинок (бавовною). Відокремлені від насінин волокнинки являють собою звичайну вату. Але основна маса бавовни йде не в аптеки, а на текстильні фабрики. Там із неї прядуть нитки і виробляють мільйони метрів бавовняних тканин, з яких потім шиють білизну, одяг і багато іншого.

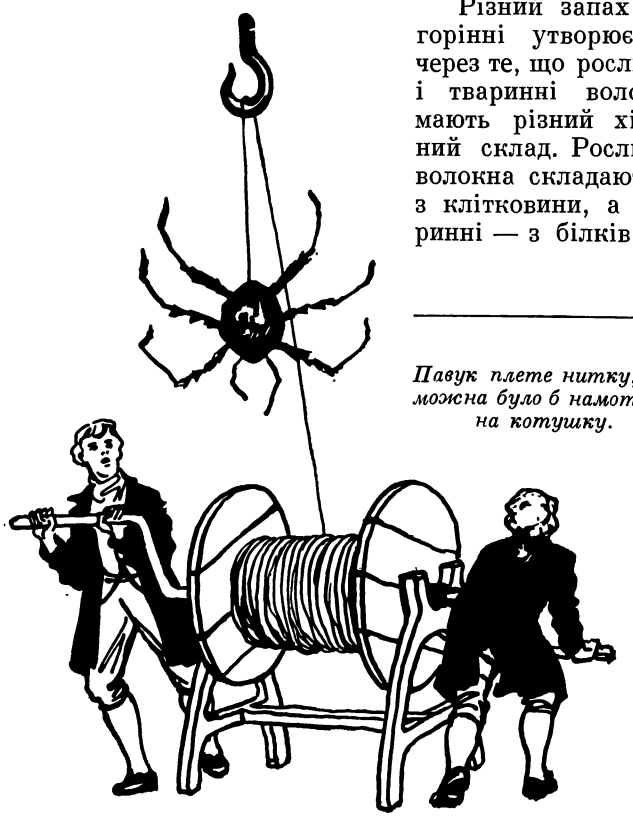
Шерстяні тканини роблять із тваринних волокон. Із шерсті овець, кіз, верблюдів теж можна прясти нитки, як із волокон бавовнику або льону. З шерстяних ниток в'яжуть

теплі шкарпетки, рукавиці, фуфайки, роблять тканини для костюмів, пальто.

Але найчудовіше волокно, мабуть, шовкове. Його виробляє маленька гусениця шовкопряда. Чи ви спостерігали коли-небудь, як павук тче свою павутину? Приблизно так само діє і гусениця шовкопряда. Вона видавлює через вузький отвір у своєму тільці в'язку рідину і витягує її у найтоншу нитку, яка твердне на повітрі. Але цю нитку гусениця не розвішує по кутках, як павук, а обмотує навколо себе — будує кокон, під захистом якого вона перетворюється спочатку в лялечку, а потім у метелика. Таких гусениць віддавна розводять на спеціальних плантаціях, кокони їх збирають, розмотують і з ниток виготовляють шовкові тканини.

Як недосвідченій людині дізнатись, яка тканина у неї в руках — бавовняна чи шерстяна, тобто з рослинного вона волокна чи з тваринного? Дуже просто! Відокремте від тканини кілька ниток і підпаліть їх. Якщо відчувається запах паленого волосся або паленої шерсті, значить, тканина тваринного походження; якщо ж з'являється запах горілого паперу — тканина з рослинних волокон.

Різний запах при горінні утворюється через те, що рослинні і тваринні волокна мають різний хімічний склад. Рослинні волокна складаються з клітковини, а тваринні — з білків.



Павук плете нитку, яку можна було б намотати на котушку.

Клітковина, або целюлоза, утворює оболонки всіх рослинних клітин (слово «целула» означає «клітинка»). Це немовби скелет рослини. У сухому сосновому чи березовому поліні клітковина становить близько половини його ваги, в льоні її ще більше, а бавовна — це майже чиста клітковина. З чого ж складається клітковина?

Шовковичний шовкопряд.

Три добре всім відомі види атомів входять до складу її молекули — вуглець, водень і кисень. Коли вчені дізнались, в якому співвідношенні входять ці атоми в молекулу клітковини, вони склали її формулу— $C_6H_{10}O_5$. Але це тільки найпростіша формула клітковини. Справжню її молекулярну формулу зображають так: $(C_6H_{10}O_5)_n$. Буква n показує, що в молекулі дуже багато груп атомів $C_6H_{10}O_5$— до кількох тисяч. Ці групи сполучені одна з одною у довгі ланцюжки. Такі ниткоподібні молекули, розташовуючись поряд одна з одною, як сірники у коробці або прути у вінику, і утворюють волокна.

Білки — обов'язкова складова частина всіх рослинних і тваринних клітин. Досить чисті білки являють собою усім відомий сир (цей білок називають казеїном) і білок курячого яйця (цей білок називають альбуміном). З білка складається наше волосся, нігті, а у тварин — шерсть, копита, роги і т. д.

Хімічний склад білків складніший, ніж склад клітковини. Крім атомів вуглецю, водню і кисню, в них обов'язково входять атоми азоту і часто атоми інших елементів. Молекулярна вага білків в окремих випадках досягає кількох мільйонів. Зрозуміло, що будова їх особливо складна.

Білки легше зазнають хімічних змін, ніж клітковина. Варто необережно капнути на шерстяний одяг розчином лугу, як тканина у цьому місці швидко розповзеться. Тому досвідчена хазяйка при пранні білизни не буде кип'ятити шерстяні вироби з щолоком чи содою.

Ось ми неначе і взнали, що являють собою волокна, з яких роблять одяг. Але

взнали ще не все. Адже тканину для одягу роблять не тільки з рослинних і тваринних волокон. Хімія не тільки допомагає людині використати на свої потреби те, що дає природа. Вона створює для нас багато нового, такого, чого в природі немає.

Гусениця шовкопряда за все своє життя дає тільки близько грама шовкової нитки. А для розведення її потрібні шовковиці, особливі кліматичні умови і старанний догляд.

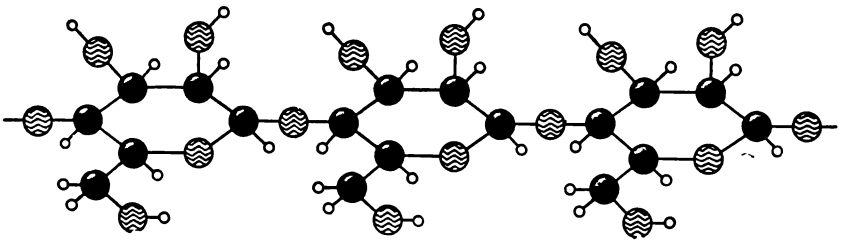
Бавовник росте повільно, вимагає багато сонця, тепла і вологи, через погану погоду легко може бути поганий врожай. Добування шерсті зв'язане з тваринництвом; худобу потрібно забезпечувати кормами, не допускати захворювань і додержувати сили інших умов.

Чи не можна створити шовк штучним способом?

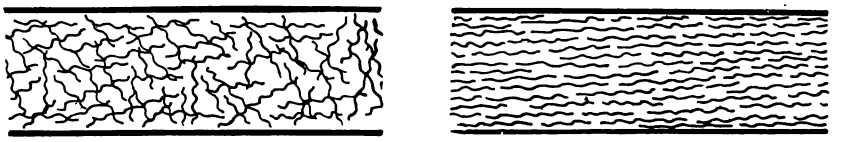
Понад 200 років тому Реомюр (пригадайте термометр Реомюра), розмірковуючи про те, як шовковичний черв'як або павук виготовляє нитки, припустив, що можна штучно добути нитки, витягуючи які-небудь густі, в'язкі, як мед, рідини. Скільки було виготовлено різних рідин, скільки разів у ці рідини опускали палички, щоб з допомогою їх витягнути нитку! Але нитки не утворювались. Гусениця залишалась незамінною. Проте саме вона знову навела вчених на вірний шлях.

Гусениця живиться листям шовковиці, клітковину листя вона перетворює в азотовмісну білкову рідину, яка на повітрі твердне в нитку. Отже, вирішили вчені, щоб добути потрібний склад, слід клітковину обробити якоюсь хімічно активною азотовмісною речовиною.

Для цього взяли азотну кислоту. Адже всім відомо, що вона сильно діє на багато речовин. Потім обробили нею бавовну (клітковину) і розчинили продукт у суміші спирту і ефіру. Утворилась сиропоподібна рідина. З неї паличками вдалось витягувати тонкі нитки, що тверднуть на повітрі. Так було добуто штучний шовк. Залишалось тільки до кінця наслідувати шовкопряда.



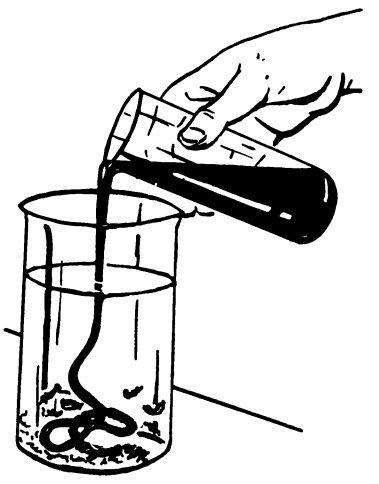
Будова молекули клітковини.



Безладне і паралельне розташування молекул.

В'язкий розчин клітковини, обробленої азотною кислотою, — нітроклітковину — почали продавлювати крізь тонкі отвори, і в результаті... на Всесвітній виставці у 1889 р. відвідувачі змогли милуватися першими зразками штучного шовку, які щодо блиску і краси були не гірші від натурального.

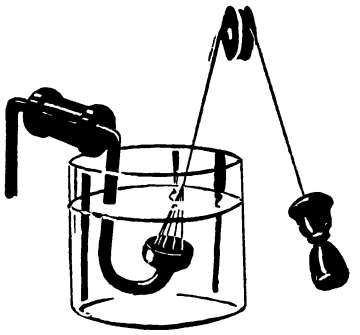
Плівочку нітроклітковини ви можете спостерігати, якщо на гладку поверхню наллєте трохи медичного колодію. Коли леткий розчинник випариться, залишиться тверда плівка колоксиліну. Це теж нітрована клітковина. Покладіть її на руку і підпаліть. Плівочка миттю згорить, не встигши обпекти руки. Горючість — найбільша хиба нітрошовку.



Виділення ниток клітковини в розчину.

Почались шукання інших способів добування штучного шовку. Так з'явились мідно-аміачний, віскозний і ацетатний шовки.

З мідно-аміачним способом добування шовку ви можете познайомитись практично у шкільній лабораторії чи навіть вдома. Прилийте до розчину мідного купоросу розчин їдкого натру.



Прядіння штучного шовку.

Утвориться голубий осад гідрату окису міді ($CuSO_4 + 2NaOH = Cu(OH)_2 + Na_2SO_4$). Відфільтруйте його і розчиніть у міцному нашатирному спирті (водному розчині аміаку). Утворюється красива темно-синя рідина.

Тепер розчиняйте в ній, помішуючи паличкою, вату—скільки може розчинитись. Утвориться мідно-аміачний розчин клітковини. Якщо тепер вилити його тонкою струминою у розчин сірчаної кислоти, то клітковина знову виділиться у вигляді пластівців і ниток. Для більшого наслідування виробничого процесу можна мідно-аміачний розчин видавлювати в осаджувальну ванну з якого-небудь насосика, наприклад з шприца. Тоді клітковина твердне у вигляді довгих ниток.

Мідно-аміачний шовк називають «павутиною з міцністю сталі». Але він тонший, ніж павутина, і тонший, ніж натуральний шовк. Проте щодо міцності він майже не гірший від натурального шовку, а красотою навіть перевищує його.

Але вас давно вже цікавить думка: «Коли ж піде мова про відомий вам віскозний шовк?» Так, віскозний шовк найпоширеніший! Він і найдешевший, тому що виготовляється з широко доступної сировини. Це про нього говорять: «Шовк з деревини». Цілком природно звернутись до деревини як сировини для добування шовку. Адже вона містить ту саму клітковину, яка утворює і бавовну.

Для виділення целюлози деревину варять з розчином бісульфіту кальцію у великих закритих котлах під тиском у кілька атмосфер. Бісульфіт руйнує речовини, які склеюють волокна клітковини. В результаті утворюється досить чиста клітковина, так звана сульфітна целюлоза. Частина її витрачається на виготовлення паперу (папір — теж клітковина), а частина — на виробництво віскозного шовку.

Сульфітну целюлозу обробляють розчином лугу і сірковуглецем CS_2. Після цього її розчиняють у розбавлених лугах. В'язкий лужний розчин клітковини і називають віскозою. Її продавлюють крізь тонкі отвори у слабкий розчин кислоти, де клітковина твердне у волокнинки.

Прикладом синтетичних волокон служать широко відомі тепер найлон, капрон, хлорин, лавсан, силон та ін. Вихідна сировина для їх добування — вугілля, вода, повітря, вапняк. В результаті складної хімічної переробки цієї широко доступної сировини створюють речовини, які мають цікаву властивість. Якщо їх піддавати нагріванню в певних умовах, то молекули їх сполучаються одна з одною у довгі ланцюги (див. статтю «Полімери»).

Ми вже можемо налічити десятки різних видів штучних і синтетичних волокон, а хіміки ще й далі дивують нас новими «рецептами» тканин.

Синтетична нитка така легка, що клубком вагою в 2 кГ можна обвити усю земну кулю.

З ЧОГО СКЛАДАЄТЬСЯ НАША ЇЖА

Надзвичайна це лабораторія — кухня! Скільки чудових хімічних перетворень здійснюється в ній!

Ви хотіли налити собі склянку молока, але, залишене в теплому місці, воно скисло, і ви з'їдаєте вже кисле молоко. Ви з насолодою вдихуєте аромат свіжоспеченого хліба, покритого апетитною скоринкою. Але ж хліб — це вже зовсім не те, що борошно, з якого він був спечений. Ви хотіли підсмажити яєчню, але

зазівались, і яєчня на сковорідці «підгоріла». А ось вариться суп. М'ясо в ньому втратило попереднє забарвлення, воно стало сірим і легко розпадається на окремі волокнинки.

Доки людина не вміла добувати вогню, вона користувалась рослинною і тваринною їжею в такому вигляді, в якому знаходила її в природі,— живилась сирим м'ясом і сирими плодами. А тепер навряд чи хто-небудь візьметься перелічити усі ті страви, що їх вміють готувати люди.

З яких же речовин складається усе це багатство сучасної кулінарії? Що відбувається з їжею при її готуванні, а потім і в нашому організмі?

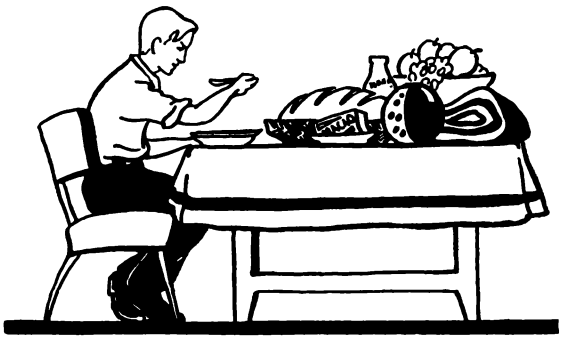
Людині для живлення потрібні насамперед три види речовин — вуглеводи, жири і білки. Продукти харчування і складаються з цих речовин. Сало і масло — це жири; у картоплі, овочах і хлібі багато вуглеводів; м'ясо, риба, яйця багаті на білки.

Кожний знає, що, крім цих речовин, людині потрібні ще вода і солі. І те і друге теж міститься в нашій їжі. Наприклад, у кожних 100 *Г* капусти 90 *Г* води. Але, крім того, воду людина вживає і окремо, а сіль добавляє в їжу. Відомо також, що наш організм потребує ще мікроскопічних кількостей так званих вітамінів.

Ми говоритимемо тут про головні складові частини нашої їжі—про вуглеводи, жири і білки.

Почнемо з... киселю! Щоб його зварити, потрібний крохмаль. Усі знають цю білу борошнисту речовину (її називають іноді картопляним борошном). Крохмаль розбовтують у воді і виливають, помішуючи, у киплячий фруктовий сироп, який зразу починає гуснути. Ось цей крохмаль і є головний представник вуглеводів, потрібних нашому організмові.

«Як же це може бути,— спитаєте ви здивовано,— адже кисіль ми їмо порівняно рідко, а вуглеводи потрібні організмові постійно?»



Справа в тому, що крохмаль ми вживаємо звичайно не в чистому вигляді, а в складі різних продуктів. Його багато в усякій рослинній їжі — в бульбах і корінні, плодах і зернах. Кожні 100 *Г* картоплі доставляють організмові близько 20 *Г* крохмалю, 100 *Г* пшеничного борошна — близько 70 *Г* крохмалю і т. д.

Щоб переконатись у тому, що крохмаль у цих продуктах є, проробимо дослід. Зітріть на тертці дві-три добре промиті картоплини. Потім загорніть картоплю у ріденьку ряднинку і розминайте пальцями у воді доти, доки не перестане утворюватись каламуть. Після цього залишок у ряднинці викиньте, а воді дайте відстоятись. Ви помітите на дні каструлі білий осад. Злийте з нього воду. Це і є крохмаль.

Щоб швидко визначити наявність крохмалю, є один дуже простий спосіб. Купіть в аптеці йодну настойку, розбавте її водою і капніть цим розчином у зварений вами крохмальний клейстер. Рідина зразу ж забарвиться в яскраво-синій колір. Розбавте клейстер у 10—20 раз водою. Він і після цього від йоду посиніє. Давайте тепер шукати крохмаль з допомогою йодної настойки в різних продуктах.

Капніть розчином на свіжий зріз картоплі, на кусочок вареної картоплі, на зріз нестиглого яблука, на скибку білого хліба, капніть навіть на пудру. Скрізь, виявляється, є крохмаль. Але синяви не буде, якщо капнути йодним розчином на шматочок сала, кусочок м'яса, на кухонну сіль або на трісочку.

Крохмаль — складна речовина, він складається з трьох видів атомів: вуглецю, водню і кисню. Ви вже пригадали, що з цих же трьох видів атомів складається і клітковина. Схожість за складом крохмалю і клітковини пря-

мо-таки разюча! У них навіть одна і та сама формула $C_6H_{10}O_5$ — і в молекулі крохмалю, як і в молекулі клітковини, таких груп — $C_6H_{10}O_5$ — тисячі. Чому ж крохмаль і клітковина—різні речовини? Причина полягає в тому, що ланки $C_6H_{10}O_5$ в молекулі клітковини сполучені в один довгий ланцюг, а в молекулі крохмалю розгалужені. Тому крохмаль не утворює волокон, а клітковину люди не вживають в їжу — вона не перетравлюється в шлунку.

У природі крохмаль перебуває у вигляді зерен в рослинних клітинах. Зерна ці можна бачити під мікроскопом. Кожне з них — це скупчення величезної кількості молекул. Коли ви терли картоплю, то розривали оболонки клітин, зерна звільнювались, відмивались і осаджувались на дно.

Чи помітили ви, що на зрізі бульби картоплі забарвлення від йоду з'являється не зразу? Це тому, що зерна крохмалю там захищені оболонкою. А у вареній картоплі клітини набрякають від води, оболонки лопаються і йод без перешкод попадає до крохмалю.

Шукаючи крохмалю, капнемо, до речі, йодом собі на руку. Та навіщо капати? Ми і так знаємо, що від йоду наша шкіра не синіє. Скільки крохмалю ми поїдаємо у вигляді хліба, картоплі, овочів, але у складі наших тканин його немає. Що ж відбувається з молекулою крохмалю, коли вона з їжею попадає в наш організм?

Який апетитний вигляд має жарена картопля! При одному її вигляді, особливо якщо ви проголодались, виділяється слина, як кажуть, «тече слинка». І вона тече недарма: для неї зараз знайдеться справа.

При пережовуванні в роті їжа сильно змочується слиною. У ній є особлива речовина — фермент а м і л а з а. Великі молекули крохмалю можуть розкладатись молекулами води на дрібніші частини, і амілаза помагає в цьому воді (див. стор. 635).

Розклад молекули крохмалю на дедалі дрібніші частини триває й далі — у шлунку і кишечнику (під впливом інших ферментів),— поки він кінець кінцем не перетвориться у г л ю к о з у — $C_6H_{12}O_6$. Її багато у винограді, вона і надає йому солодкого смаку. Тому глюкозу часто називають виноградним цукром.

Наш організм крохмаль безпосередньо не засвоює, тому що його великі молекули не можуть всмоктуватись у кров крізь стінки кишечника. Маленькі, розчинні у воді молекули глюкози, навпаки, легко проникають у кровоносні судини і доставляються течією крові до всіх тканин організму. Там глюкоза окислюється киснем, що надходить з кров'ю, і перетворюється у вуглекислий газ і воду. При цьому виділяється тепло. Воно дає організмові життєву енергію і підтримує певну температуру тіла. Отже, крохмаль — це немовби паливо нашого організму.

Тепер зрозуміло, чому кволому хворому для зміцнення сил лікарі прописують глюкозу.

Дивовижне явище! Якщо крохмаль цілком перетворюється в глюкозу, то глюкози виходить більше, ніж було крохмалю. Кожна ланка $C_6H_{10}O_5$ перетворюється в молекулу глюкози $C_6H_{12}O_6$. Порівняйте ці формули. Між ними різниця на молекулу води — H_2O. Перетворення крохмалю в глюкозу до того і зводиться, що до кожної ланки $C_6H_{10}O_5$ прилучається молекула H_2O. Цю реакцію зображають так:

$$\underset{\text{крохмаль}}{(C_6H_{10}O_5)_n} + \underset{\text{вода}}{nH_2O} = \underset{\text{глюкоза}}{nC_6H_{12}O_6}.$$

Розклад речовини водою називають г і д р о л і з о м. При гідролізі крохмалю, раніше ніж з'явиться глюкоза, утворюється багато проміжних речовин, молекули яких дрібніші, ніж молекули крохмалю, але ще крупніші, ніж молекули глюкози. З цих речовин особливо важливі д е к с т р и н и.

Чому не їдять сиру картоплю, а попереду варять чи смажать її? Чому не живляться безпосередньо борошном, а печуть з нього хліб? Та тому, що при варінні, жаренні і печінні крохмаль вже починає зазнавати гідролізу — з нього утворюються декстрини. А в нашому організмі вони швидше і легше перетворюються в глюкозу, ніж сам крохмаль.

Декстрини клейкі. З них утворюється тверда скоринка на жареній картоплі або печеному хлібі. Їх появою пояснюється і клейкість крохмального клейстеру. Накрохмалений комірець під гарячою праскою стає твердим також тому, що крохмаль перетворюється в декстрин.

Повернемось знову до нашої «хімічної лабораторії» — домашньої кухні. Вже було розповідано (стор. 635), як печуть хліб чи пироги. Борошно змішують з водою, добавляють дріжджі і сильно місять. Після цього тісто ставлять у тепле місце і дають йому «підійти». Постежте-но за ним у цей час. Тісто потроху підіймається, на ньому лопаються якісь бульбашки. Піднесіть до тіста запалену скалку. Вона гасне, як у вуглекислому газі. Та це і є вуглекислий газ. У тісті під впливом ферменту

Цукрова тростина і цукровий буряк.

дріжджів іде бродіння. В ньому нагромаджується вуглекислий газ, який підіймає тісто і навіть виходить назовні. Від цього хліб при випіканні стає пористим. Такий хліб краще перетравлюється в організмі.

Але ж при бродінні утворюється спирт. Ви зможете виявити і його. Понюхайте тісто, яке піднялось і вже перестояло: воно пахне спиртом.

До вуглеводів, що йдуть нам у їжу, крім крохмалю і глюкози, належить ще сахароза, або буряковий цукор. Цей цукор ми вживаємо в їжу.

Цукор спочатку було знайдено в соку цукрової тростини, і Європа довго не знала його, тому що тростина росла тільки в тропічних країнах. Але ось у XVIII ст. цукор знайдено було в буряках. Здавалось би, що може бути простіше: потерти буряки, вичавити сік, випарити його — і цукор готовий. Але він ще довго не давався в руки хімікам. Скільки було невдач, раніш ніж почали працювати заводи по добуванню цукру з цукрових буряків! Тепер ці заводи виробляють в усіх країнах мільйони тонн цукру щороку.

Цукор — не тільки ласощі, він дуже поживний! Молекула його не складна—$C_{12}H_{22}O_{11}$. В організмі людини вона розкладається на молекулу глюкози і молекулу фруктози:

$$\underset{\text{сахароза}}{C_{12}H_{22}O_{11}} + H_2O = \underset{\text{глюкоза}}{C_6H_{12}O_6} + \underset{\text{фруктоза}}{C_6H_{12}O_6}.$$

Глюкоза і фруктоза мають однакові формули, але різняться одна від одної будовою молекул. Дальша доля глюкози в організмі нам відома. Такий самий шлях і у фруктози.

Якщо вас запитають, що більш солодке — мед чи цукор, ви, мабуть, назвете мед. А чи знаєте, чому він солодший за цукор? Мед — це суміш глюкози і фруктози, а фруктоза солодша за цукор.

Вуглеводи на наш стіл поставляє природа. Зелений лист рослини — ось та чудова фабрика, яка виготовляє їх. На нього падає світловий промінь. Він не пропадає безслідно. Коштом світлової енергії між водою, що надходить до листа із землі, і вуглекислим газом, що вбирається з повітря, відбувається хімічна реакція: $6CO_2 + 5H_2O = C_6H_{10}O_5 + 6O_2$. Утворюються крохмаль і кисень. Ось куди йде вуглекислий газ, яким «дихає» рослина, і ось звідки береться кисень, що його «видихує» рослина в атмосферу.

Вуглекислого газу і води багато навколо нас. Чи не спробувати штучно виготувати вуглеводи для нашої їжі? Утворення вуглеводів у листі йде під впливом особливого каталізатора — зеленого хлорофілу, який немовби ловить світловий промінь і його енергію перетворює в хімічну. Але в лабораторії цей синтез так просто не відбувається. Все-таки нашому славетному хімікові О. М. Бутлерову

вдалося (щоправда, іншим шляхом) штучно добути цукристий вуглевод. Крохмаль поза зеленим листом поки що не добули, але немає сумніву, що й таке завдання вчені зможуть розв'язати. І тоді реакція вуглекислого газу з водою в лабораторії, а потім і на заводі даватиме вуглеводи до нашого столу.

Тепер про ж и р и. Їх відомо багато. Одні з них тверді; це переважно жири тваринні — бараняче і свиняче сало, коров'яче масло. Інші — рідкі; це в основному рослинні олії. Вони містяться в насінні конопель, льону, соняшника і т. д.

Молекули жирів, як і молекули вуглеводів, складаються з атомів вуглецю, водню і кисню. При гідролізі вони розпадаються на молекули гліцерину і «жирних кислот». Стеарин, з якого колись робили свічки,— це і є суміш «жирних кислот». Перетравлювання жирів починається лише при виході їжі з шлунка в тонкі кишки, тому що ні слина, ні шлунковий сік на них не діють.

Під дією ферменту тонких кишок — л і п а з и — вони розкладаються водою на гліцерин і кислоти і всмоктуються крізь стінки кишечника в організм. При окисленні жирів у тканинах організму виділяється більше тепла, ніж при окисленні вуглеводів. Таким чином, жири — більш калорійне «паливо» для нас.

Вуглеводи і жири можуть частково замінювати одне одного в їжі. На півночі, де бідна рослинність і низька температура, людина споживає переважно жирну їжу, а на півдні, багатому на рослинність, де організмові не доводиться витрачати стільки тепла, людина живиться більше овочами і фруктами.

Якщо вам запропонувати до столу вершкове масло або олію, ви виберете перше. Кожному відомо, що тваринні жири смачніші, ніж рослинні. Тверді тваринні жири у великій кількості використовуються також і в миловарінні. Звідки ж взяти стільки жирів? Розв'язати це завдання нам допомогла хімія. Вона навчилася перетворювати рідкі рослинні олії у тверді жири.

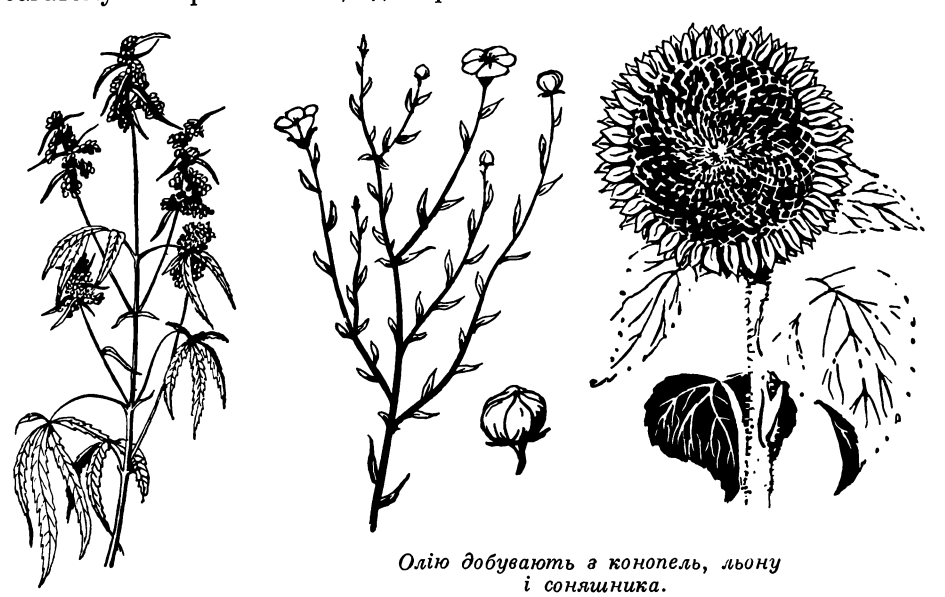
Виявилось, що коли в рідкій рослинній олії розмішати дрібний порошок металу нікелю, а потім пропускати водень, то водень прилучається до олії і утворюється твердий жир. Нікель служить каталізатором у цій реакції г і д р о г е н і з а ц і ї (гідрогеніум — водень). Гідрогенізований жир використовують для виготовлення м а р г а р и н у.

Маргарин готують, сильно перемішуючи суміш тваринних і гідрогенізованих жирів з молоком. Для більшої споживності до нього добавляють ще вітаміни. Він дуже добре засвоюється організмом і за поживністю не гірший, ніж звичайні жири.

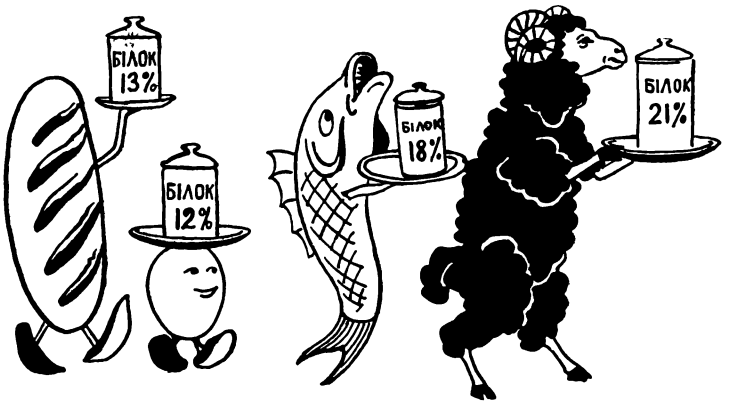
Про білки ми вже знаємо, що це дуже складні органічні речовини, до складу молекул яких, крім атомів вуглецю, водню і кисню, входять ще атоми азоту і інші елементи. Тому що білки — «носії життя» і входять до складу всіх живих клітин, ми неминуче вживаємо їх у їжу однаково, чи живимось ми рослинною чи тваринною їжею.

Але головними «поставщиками» білків для нас служать м'ясо (у ньому білка приблизно 21%), риба (18%), яйця (12%), хліб (у сухому хлібі — 13%).

Білки — це насамперед «будівельний матеріал» тканин організму. Один учений сказав, що клітини організму — це печі, побудовані з білка, в яких горять жири і вуглеводи. Але й білки теж зазнають змін у нашому організмі. Вони неначе «зношуються», згоряють і вимагають заміни. Безперервне оновлення клітин організму йде коштом білків їжі.



Олію добувають з конопель, льону і соняшника.



Отже, білки неможливо замінити вуглеводами або жирами, як ті замінюють одне одного. При відсутності їх у їжі людина починає худнути, тому що витрата їх перестає поповнюватись. При тривалому білковому голодуванні може настати повне виснаження і смерть.

Складні молекули білків під впливом різних ферментів (п е п с и н у і т р и п с и н у) у травному тракті зазнають гідролізу. Утворюються простіші речовини — а м і н о к и с л о т и. Вони всмоктуються у кров, і з них вже організм будує свої власні білки (див. стор. 691).

Подивимось тепер, що ж відбувається з білками у нашій кухонній лабораторії. Білок яйця на сковорідці зсівся, став не розчинним у воді, але він, звичайно, зберіг свої поживні властивості. Зсілі білки м'яса ми спостерігаємо у вигляді пластівців на поверхні супу. Щоб він мав кращий вигляд, хазяйки видаляють їх. Цього робити не слід, тому що з білковими пластівцями суп буде поживніший.

Якщо вдома при варінні супу хочуть мати смачне м'ясо, порадьте опускати його в киплячу, а не в холодну воду. Білки м'яса при цьому швидко зсядуться і закриють вихід із м'яса в суп іншим білкам і смаковим речовинам. М'ясо стане смачним, але бульйон буде не дуже приємний. Навпаки, якщо хочуть мати наваристий бульйон, то м'ясо слід класти в холодну воду. Білки і смакові речовини м'яса при цьому безперешкодно переходитимуть у суп. М'ясо в цьому випадку вийде досить прісне, але суп буде смачний.

Знання властивостей білків пояснить нам ще одне явище, якого ми вже трохи торкались. Коли мова йшла про випікання хліба, чи не виникло у вас питання: «Чому хліб залишається пористим навіть після того, як вуглекислий газ випарився з нього?»

Візьміть трохи борошна, загорніть у ріденьку полотнинку і, як раніше з тертою картоплею, відмийте від нього крохмаль. На полотнинці залишиться білок — клейковина. Її недарма так названо, ви навіть на дотик можете переконатись в її клейкості. Тепер вже ясна відповідь: клейковина утворює навколо бульбашок вуглекислого газу міцну плівочку, яка залишається і після того, як вуглекислий газ вирветься назовні.

Є простий спосіб розпізнавання білкових речовин за їх запахом при горінні. Але ми познайомимось з більш досконалим, чисто хімічним способом.

Розбавте білок курячого яйця водою, добавте розчин лугу, потім кілька крапель розчину мідного купоросу і злегка нагрійте. З'являється фіолетове забарвлення. Тепер, знаючи цю реакцію, пускайтесь з нею в дослідження по вашій «лабораторії». Прокип'ятіть шматочок м'яса або візьміть трохи супу і випробуйте його з допомогою лугу і мідного купоросу. Випробуйте клейковину, кусочок риби. Прокип'ятіть з лугом шерсть або волосся і перевірте, чи дадуть вони фіолетове забарвлення. Або інший спосіб. Додайте до розбавленого водою білка кілька крапель концентрованої азотної кислоти, і ви помітите білий осад, що поступово жовтіє. Жовті плями на руках у тих, хто неакуратно поводиться з азотною кислотою, — результат реакції кислоти з білками шкірного покриву.

На закінчення нашої екскурсії по хатній лабораторії зробимо дослідження молока.

Це чудове сполучення всіх потрібних для живлення людини речовин, про які ми щойно говорили. Недарма самим тільки молоком матері живиться дитина, яка починає життя. У кожних 100 *Г* молока міститься приблизно по 4 *Г* вуглеводів і жирів і 5 *Г* білків; є в ньому і вітаміни.

Молоко при стоянні покривається шаром вершків. Це спливають нагору найдрібніші крапельки жиру. На вигляд вершки немовби не схожі на жир. Але ви знаєте, що коли їх збивати, то утвориться чудове вершкове масло. Зніміть вершки з молока ложечкою. Добавте до знятого молока кілька крапель оцту. На ваших очах відбудеться зсідання молока. Це зсідається білок — к а з е ї н. Відокремте сирнисту масу від сироватки і проробіть з білком ту чи іншу відому вам кольорову реакцію.

Сироватка являє собою розчин у воді вуглеводу — м о л о ч н о г о ц у к р у — і певної кількості солей. Молочний цукор дуже схожий на звичайний і легко засвоюється молодим організмом. Саме молочний цукор, а не крохмаль є тут представником класу вуглеводів.

Скисання молока часто відбувається без додавання оцту, під дією кислоти, що утворюється в самому молоці. У повітрі завжди носяться так звані молочнокислі бактерії.

Попадаючи в молоко, ці бактерії спричиняють бродіння молочного цукру. При цьому утворюється м о л о ч н а к и с л о т а, під дією якої і зсідається казеїн.

Якщо молоко довго стояло, і ви боїтесь, що воно може зсістися при кип'ятінні, добавте до нього трохи питної соди. Вона нейтралізує кислоту, і молоко можна безбоязно кип'ятити.

Тепер, коли ви сядете до обіду або сніданку, ви можете про багато дечого поміркувати. Подумайте, з чого виготовлено кожну вашу страву, і уявіть собі увесь ланцюг хімічних перетворень споживаних вами речовин.

Які ж речовини і в якій кількості потрібні людині для щоденного нормального живлення? За добу людина виділяє приблизно 260 *Г* вуглецю у вигляді вуглекислого газу і близько 20 *Г* азоту у вигляді сечовини. Ці 280 *Г* повинні щодня повертатись нашому організмові у вигляді їжі. Очевидно, що їсти тільки вуглеводи і жири не можна, тому що у складі їх немає азоту. Для побудови тканин нашого організму неодмінно потрібні білки, в яких міститься азот. Але їсти тільки білки теж не можна, тому що в них азоту далеко більше, ніж потрібно нашому організмові: на кожні 260 *Г* вуглецю припадає азоту не 20, а 80 *Г*. Потрібні кількості вуглецю і азоту матимемо, якщо, наприклад, візьмемо 130 *Г* білка і 500 *Г* вуглеводів. Вуглеводи, як ми знаємо, можна заміняти в їжі жирами. Жири багатші на вуглець, тому їх можна було б взяти менше. Але вони заміняють вуглеводи тільки частково. При правильному співвідношенні білків, жирів і вуглеводів перетравлювання їх рівномірно розподіляється по травному тракту, і їжа краще засвоюється організмом.

Часто склад їжі визначають за к а л о р і й н і с т ю різних продуктів. Людина в процесі своєї життєдіяльності витрачає енергію. Її обчислюють в кілокалоріях тепла. Ваш організм, наприклад, витрачає близько 2000 *ккал* за добу. При важкій, фізичній праці доросла людина витрачає до 5000 *ккал*. Ця енергія утворюється коштом окислення в нашому організмі білків, жирів і вуглеводів. Кожний грам білка або вуглеводу дає при цьому 4,1 *ккал*, а один грам жиру — 9,3 *ккал*. Тепер неважко підрахувати, що для утворення, наприклад, 3000 *ккал* на добу потрібно мати в їжі близько 100 *Г* білків, близько 70 *Г* жирів і близько 500 *Г* вуглеводів.

Як бачимо, цей спосіб підрахунку приводить загалом до тих же результатів, що й викладений раніше.

ШТУЧНЕ ДОБУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Отже, основні елементи продуктів живлення людини і тварин — це жири, вуглеводи і білки. Чи можна їх добути штучним способом?

Ще в 1854 р. Бертело вдалося синтезувати жири, нагріваючи гліцерин з жирними кислотами. Після цього завдання синтезу жирів було зведено до шукання економічно вигідного способу виробництва вихідних речовин — гліцерину і жирних кислот. Вперше промисловий синтез харчових жирів був здійснений у Німеччині в роки другої світової війни. Гліцерин добували з пропілену — одного з газоподібних продуктів розщеплення (крекінгу) нафти. Жирні ж кислоти синтезували з вугілля і води так.

Добуту з вугілля і води при високій температурі суміш окису вуглецю і водню перетворювали в суміш вуглеводнів, що називається с и н т и н о м. Потім його окислювали при підвищеній температурі в присутності каталізаторів. В результаті утворювались жирні кислоти.

При нагріванні гліцерину з кислотами утворювались жири. Вони мали тільки одну відміну від природних харчових жирів. Природні жири — це продукти сполучення гліцерину тільки з такими жирними кислотами, молекули яких містять парне число вуглецевих атомів. А штучні жири добували із суміші кислот, що містять як парне, так і непарне число вуглецевих атомів. Виявилось, що людський організм засвоює ці жири не гірше, ніж природні.

Добуті описаним вище способом жири були безбарвні, а за консистенцією нагадували вершкове масло. Їх підфарбовували у злегка жовтуватий колір і вітамінізували. Таким способом у Німеччині були виготовлені і вживались в їжу десятки тисяч тонн замінників вершкового масла.

Історія досліджень по синтезу вуглеводів, або цукрів, теж налічує майже століття. Перший синтез цукру здійснив О. М. Бутлеров. Добутий ним з формальдегіду метиленітан, що належить до класу цукрів, являв собою суміш кількох цукристих речовин. Але ці речовини не засвоюються організмом людини. Наш організм може засвоювати молекули цукрів лише з точно визначеним розташуванням атомів у просторі. Так, із багатьох десятків ізомерних цукрів складу $C_6H_{12}O_6$ він віддає перевагу тільки двом — глюкозі і фруктозі. Синтетичні ж цукри — це строката суміш продуктів найрізноманітнішої просторової будови.

Тимчасові труднощі з синтезом цукрів ще не означають, що їх тепер взагалі не можна добути штучним способом. Хіміки використали тут інший шлях. При дослідженні будови молекул клітковини було встановлено, що ці молекули-гіганти складаються з ланок — молекул виноградного цукру (глюкози), які багаторазово повторюються. Виникла ідея зруйнувати молекули клітковини і добути виноградний цукор. Це легко здійснити, нагріваючи деревину з розбавленими кислотами.

Найскладніше стоїть справа тепер з проблемою синтезу білкових речовин. Адже вони мають надзвичайно складну будову. Тут лише намічаються шляхи підходу до розв'язання проблеми.

80 років тому А. Я. Данилевський зробив перші спроби синтезувати білки з допомогою ензимів (ензими, або ферменти,— органічні каталізатори, що утворюються в живих організмах; про них докладно розповідано на стор. 635).

Вчений знайшов, що ензим пепсин здатний не тільки розщеплювати, але при певних умовах виконувати і зворотну роль, тобто синтезувати білковоподібні речовини з продуктів їх розщеплення. Такі білковоподібні речовини — пластеїни — мали молекулярну вагу від 2000 до 6000.

Але ензиматичний синтез білкових речовин не повний, тому що в цьому випадку як вихідні речовини вживають продукти гідролізу самого білка, що являють собою складну суміш речовин далеко не з'ясованої будови.

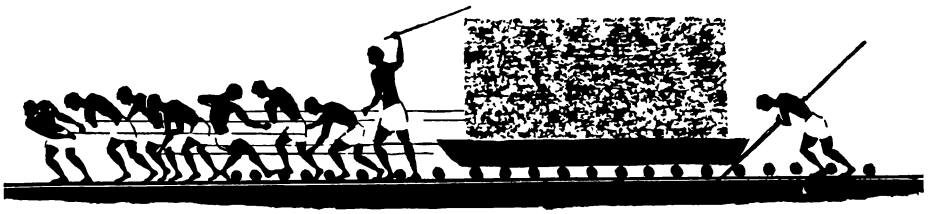
ХІМІЧНІ ДЖЕРЕЛА СИЛИ

Протягом століть для створення матеріальних цінностей використовували м'язову силу людей і тварин. Але у XVIII ст. з'ясувалось, що залізні частини машин витриваліші, спритніші і сильніші, ніж живі м'язи. Настав вік машин. Але машини, як і люди, вимагали їжі, і вона знайдена була у вигляді кам'яного вугілля і нафти.

Нафта і вугілля збереглись у надрах Землі з доісторичних часів, коли по землі ще не ступала нога людини, немовби передбачаючи такий момент, коли виникне потреба у постійному і зручному джерелі рухової сили для фабрик, автомобілів, літаків.

Нам потрібна енергія як джерело рухової сили. Отже, нам потрібні речовини, які служили б вмістищем енергії і в яких вона могла б спокійно дрімати доти, доки не стане потрібною. Таким джерелом енергії, зв'язаним з речовиною, служить енергія хімічної спорідненості, яка звільняється при хімічних реакціях. Найзручніше для цієї мети використати хімічну спорідненість елементів до кисню, тому що він доступний скрізь. Таким чином, ми приходимо до горючих речовин як до найбільш простого способу задоволення нашої потреби в зручних джерелах енергії.

Які ще побажання ми мали б до «ідеального» пального для двигунів? Насамперед щоб його не важко було зберігати і перево-



зити. Бажано також, щоб продукти горіння легко видалялись з камери згоряння, не засмічуючи її, і не отруювали атмосфери. Першу умову — легкість зберігання, навантаження і транспортування — найбільше задовольняють рідкі речовини. Продукти їх горіння для виконання другої вимоги повинні бути обов'язково леткі. Тоді видалятись вони будуть автоматично.

Таке пальне і дає нам природа у вигляді нафти. Здавалося б, хімікові тут нічого робити — тільки поділяти природну нафту на фракції з різним ступенем леткості, відповідно до спеціальних вимог двигунів різного типу — авіаційних, автомобільних і тракторних, дизельних. Так, паливо для поршневих авіадвигунів — авіаційний бензин — повинне википати в межах температур 40—180° і замерзати не вище — 60°.

Але незабаром і тут хімікам знайшлася справа. Після першої світової війни авіація і автотранспорт почали розвиватись так стрімливо, що бензину прямої гонки для них вже не вистачало. Виникло завдання створити штучний бензин. І воно незабаром було розв'язане відразу кількома способами. Найцінніший з них, як виявилось, був к р е к і н г — розщеплення висококиплячих нафтопродуктів,— вперше запатентований в Росії інженером В. Г. Шуховим.

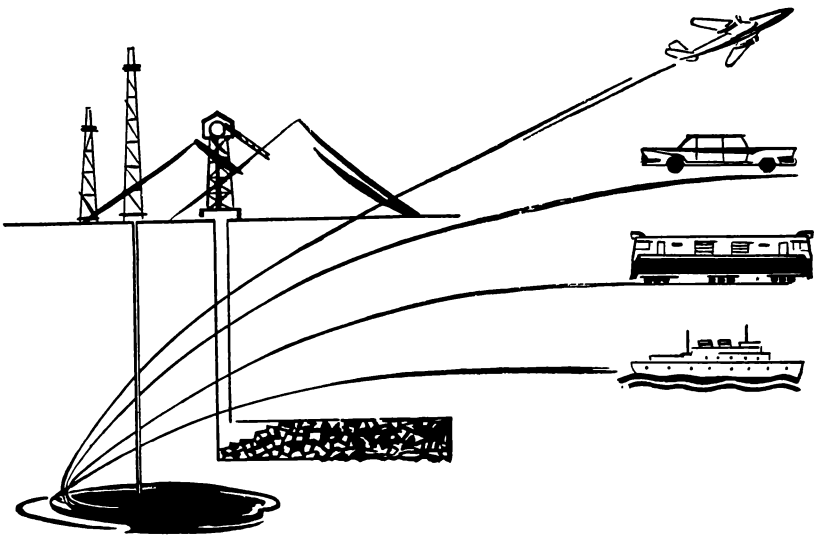
Вуглеводні тим більш леткі, чим легша їх молекула. Будова її тут майже не відіграє ролі. Молекули різної будови, які, проте, містять у собі однакове число вуглецевих атомів, мають приблизно однакову леткість. Крекінг у тому і полягає, що під впливом високих температури і тиску розщеплюються громіздкі молекули вуглеводнів, що скупчились у важких погонах нафти — газойлі, соляровому маслі, мазуті,— на легкі і рухливі «осколки», придатні для живлення авіадвигунів. Це реакція якраз протилежна реакції полімеризації.

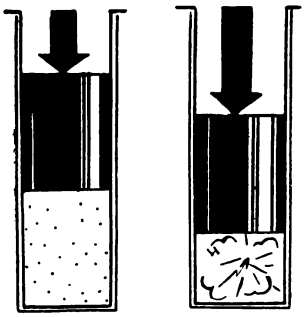
Але незабаром перед хіміками — творцями штучного моторного палива — виникли нові, важчі завдання, для розв'язання яких знову потрібне було втручання структурної теорії.

У перших двигунах внутрішнього згоряння як рухову силу використовували не більше $^1/_2$ енергії, що міститься у рідкому паливі, яке живить їх. Вже це вважали великим досягненням, тому що коефіцієнт корисної дії доброї старої парової машини не перевищував яких-небудь 5%. Але розрахунки переконливо показали, що це не межа. Коефіцієнт корисної дії двигунів внутрішнього згоряння можна і далі нарощувати дуже простим, з погляду конструктора, способом: створюючи двигуни з дедалі більшим ступенем стиску. А кожний зайвий процент у коефіцієнті корисної дії означає зайві кілометри пробігу автомобіля чи польоту літака при тій самій витраті пального, підвищує швидкість, що її розвиває літак, і його «стелю».

До якої ж межі можна збільшувати ступінь стиску робочої суміші у двигуні? Виявляється, лише до тієї межі, яку допускає паливо. Як тільки ця межа досягнута, нормальне згоряння палива, що надає плавного ходу поршню, порушується. Починається детонація, вибухи горючої суміші в циліндрі, і мотор швидко виходить з ладу.

Тепер уявіть собі, що перед вами дві горючі





Рідини, які не можна відрізнити одну від одної ні за запахом (в обох із них усім знайомий запах бензину), ні за іншими зовнішніми ознаками. Більше того, вони мають одну і ту саму густину, якщо вимірювати її не надто чутливими приладами, майже одну і ту саму точку кипіння і т. д. Однаковий у них і склад молекули — C_5H_{12}. Обидві речовини однаково поводять себе у двигунах з малими ступенями стиску, але при більших ступенях стиску одна детонує, а друга ні. Інакше кажучи, одна залишається повноцінним паливом, а друга стає у даних умовах паливним браком, на ній мотор працювати не може.

У чому ж тут справа? Оскільки склад молекул обох речовин однаковий, різниця може полягати тільки в будові молекул. Так воно і є. На рис. 1 під буквою *а* показано структуру молекули «благополучної» горючої речовини, а під буквою *б* — «неблагополучної». У першій молекулі ланцюжок з вуглецевих атомів розгалужується, у другій — ні.

Природно припустити, що вуглеводні із ще більше розгалуженим ланцюгом вуглецевих атомів виявляться ще стійкішими проти детонації. Так і є в дійсності. Через сильну розгалуженість вуглецевого ланцюга один з ізомерів октану довгий час залишався непереверненим авіаційним пальним за своєю стійкістю проти детонації. З ним порівнювали стійкість проти детонації всіх авіаційних бензинів, виражаючи її «октановим числом» і приписавши самому ізооктанові октанове число 100. Недарма англійські спостерігачі, аналізуючи дослід перших повітряних боїв на Західному фронті на початку другої світової війни, відкрили «закон»: у повітряному бою перемагає льотчик, у баках літака якого міститься бензин з найбільшим октановим числом.

У бензинах прямої гонки завжди міститься ізооктан, але в дуже малій кількості. І замість того щоб добувати його з нафти, хіміки вступили на шлях синтезу — штучного добування ізооктану. Зручною сировиною для синтезу ізооктану виявились покидькові гази крекінгу, що складаються з низькокиплячих вуглеводнів, в тому числі ізобутану. Спосіб же перетворення ізобутану в ізооктан не довелося відкривати заново. Виявилось, що жодної таємниці тут немає. Його виробляють точно так, як він вперше добутий був у малій кількості в лабораторії сімдесят років тому основоположником вчення про будову молекул О. М. Бутлеровим.

Проте коли в авіацію замість поршневих прийшли реактивні двигуни, коли з'явились потужні балістичні ракети, вимоги до пального докорінно змінились. Тут особливо важливо, щоб у найменшій вазі пального зосереджена була найбільша кількість енергії. Питання ж про детонацію відпадає.

Як джерело хімічної енергії, крім горючих, широко використовують вибухові речовини. В їх складі, крім вуглецевих і водневих, є атоми азоту і кисню. Але щоб зрозуміти, чому такі речовини вибухові, знов потрібно звернутись до будови їх молекул.

На рис. 2 показано структуру молекули толу. Горючість горючих речовин зумовлюється тим, що атоми вуглецю і водню мають велику хімічну спорідненість до кисню і поривають сполучитись з вільним киснем у молекули води і вуглекислого газу. Це і відбувається при горінні. У молекулі толу вже містяться атоми кисню. Але вони не зв'язані ще з атомами водню і вуглецю, а відокремлені від них «бар'єрами» з атомів азоту. Молекула перебуває у напруженому стані, подібно до зведеного курка, якому заважає вдарити по патрону

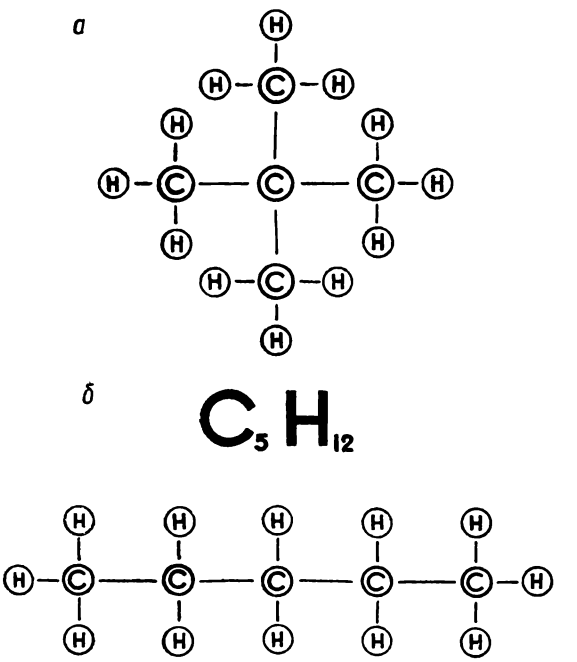


Рис. 1.

механізм «собачки». Тому легко зрозуміти, що нагрівання, удар, іноді «нез'ясована причина» здатні спричинити руйнування цього нестійкого сполучення атомів.

Атоми азоту викидаються з молекули геть і, зв'язуючись попарно, утворюють молекули N_2. Атоми ж кисню летять по звільнених шляхах до атомів водню і вуглецю. З першими вони сполучаються в молекули водяної пари, а з другими — в молекули вуглекислого газу і окислу вуглецю.

З однієї молекули толу утворюється до десятка молекул різних газів. Але гази намагаються безмежно розширитись і чинять при розширенні тим сильніший тиск на зовнішні перешкоди, чим у більшій кількості вони зосереджені у даному просторі і чим сильніше нагріті. Якщо заряд толу був закладений у вузьку тріщину в скелі, раптове утворення великої кількості сильно нагрітих газів діє на стінки тріщини як страшенний удар зсередини. Скелі дробляться, і осколки викидаються газами, що линули.

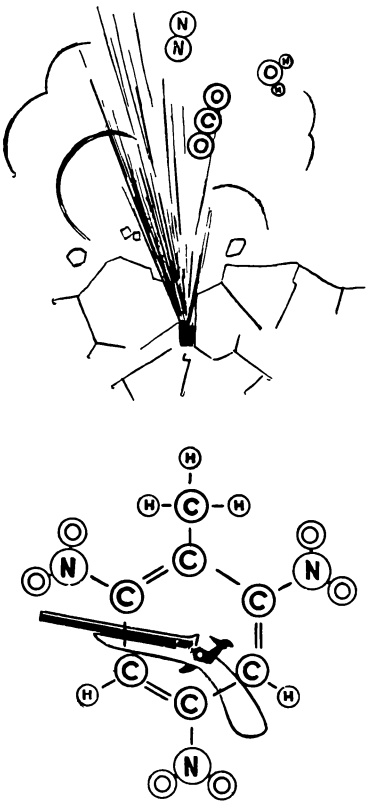


Рис. 2.

Як «бар'єр» у молекулах вибухових речовин пробували застосовувати і атоми інших елементів. Ще на початку минулого століття французький вчений Бертолле запропонував застосовувати для цієї мети атоми хлору. Але швидко збудований завод наприкінці першого ж дня роботи був перетворений страшенним вибухом на купу руїн. Бар'єр з атомів хлору виявився не досить надійним і прорвався раніше, ніж це було потрібно.

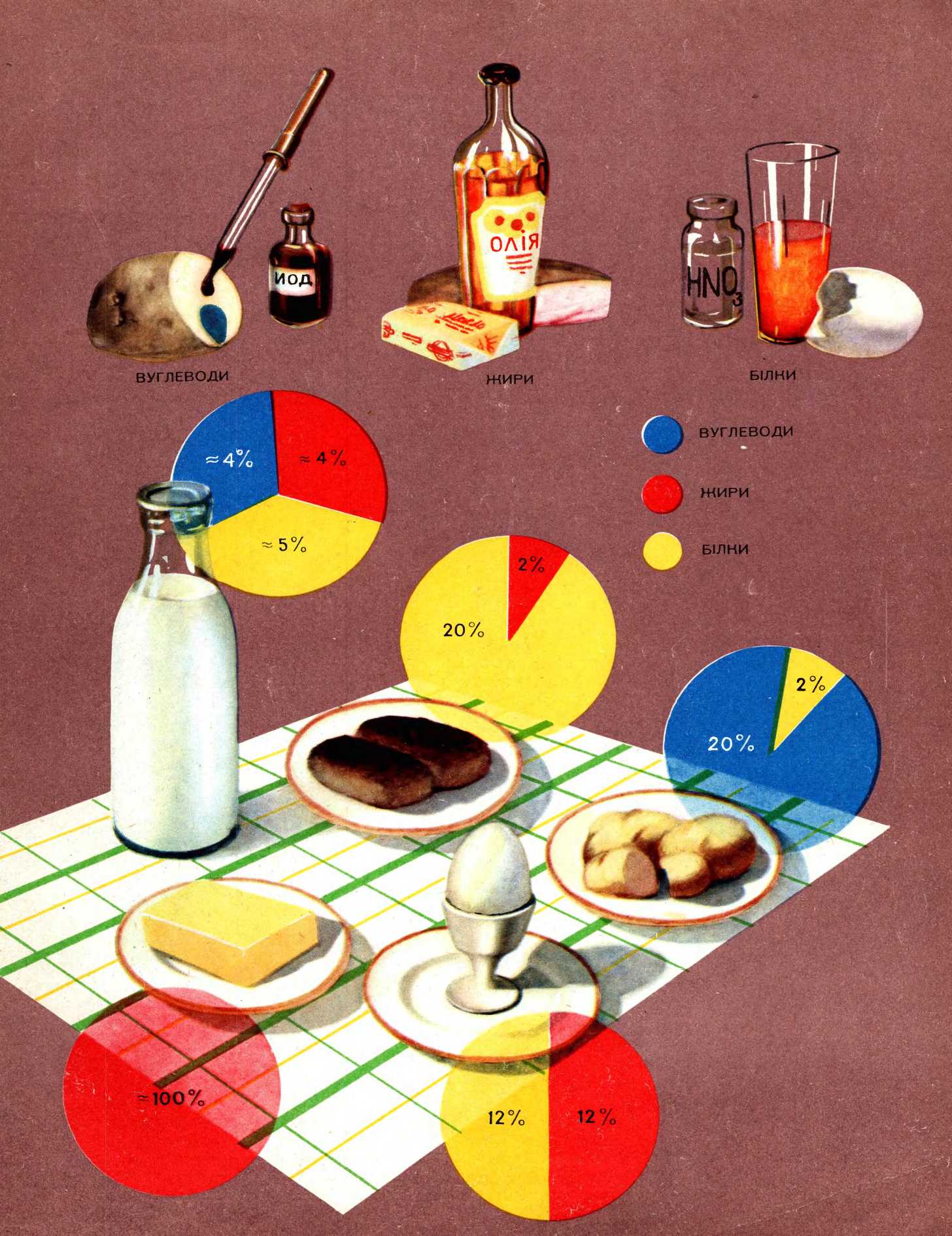
Основні якості роботи вибухових речовин — незвичайна сила і швидкість — створюють їм у ряді випадків незаперечні переваги перед горючими речовинами. З їх допомогою прокладають тунелі крізь гірські масиви, добувають мільйони тонн руди, лісові ділянки перетворюють в орну землю і здійснюють багато інших корисних справ.

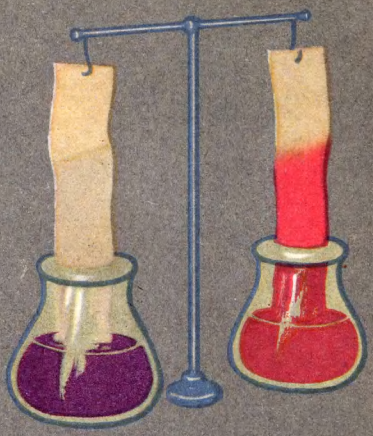
ЯК БУЛИ СТВОРЕНІ ШТУЧНІ ФАРБИ І АРОМАТИЧНІ РЕЧОВИНИ

Людині властиве прагнення до красоти. Розкопки доісторичних жител і розповіді мандрівників про побут відсталих народів свідчать про те, скільки докладали зусиль і винахідливості, щоб прикрасити життя навіть на перших ступенях цивілізації. І насамперед в шуканні барвників людина зверталась до скарбниці природи.

Природа надзвичайно багата на барви, але більшість їх виявилась непридатною для практичних цілей, головним чином через нетривкість. Тому, щоб знайти речовини, які справді придатні бути фарбами, людям довелося пірнати глибоко в море, щоб викрасти у молюска «мурекса» краплю безбарвної рідини, яка перетворюється від дії сонця і повітря у п у р п у р. Довелося обробляти мільйони гектарів землі в Азії і Європі під рослини, з яких добувають а л і з а р и н і і н д и г о. Ці старовинні фарби настільки міцні, що досі не вицвіли забарвлені ними матерії, добуті із стародавньоєгипетських гробниць. Довелося

Таблиця 47. Склад харчових продуктів: молока, м'яса, картоплі, масла, яєць (не рахуючи води). Вгорі — виявлення крохмалю і білка.


ВУГЛЕВОДИ
ЖИРИ
БІЛКИ
ВУГЛЕВОДИ
ЖИРИ
БІЛКИ
≈4%
≈4%
≈5%
2%
20%
2%
20%
≈100%
12%
12%



збирати мільйони попелиць особливого виду, щоб, висушивши їх, добути дуже гарну фарбу — кошеніль.

Природно, що фарби, добуті з такими труднощами, коштували дуже дорого і були доступні тільки багатим людям. Особливо це стосується пурпуру. Хімікові Фрідлендеру, щоб встановити будову молекули пурпуру і дістати 1,4 *г* цієї фарби, довелося переробити 12 тис. слимаків. Судячи з цього, забарвлювання пурпуром царської мантії повинно було коштувати сотні тисяч карбованців. Колись носіння пурпурного одягу служило ознакою належності до вищої верстви пануючого класу.

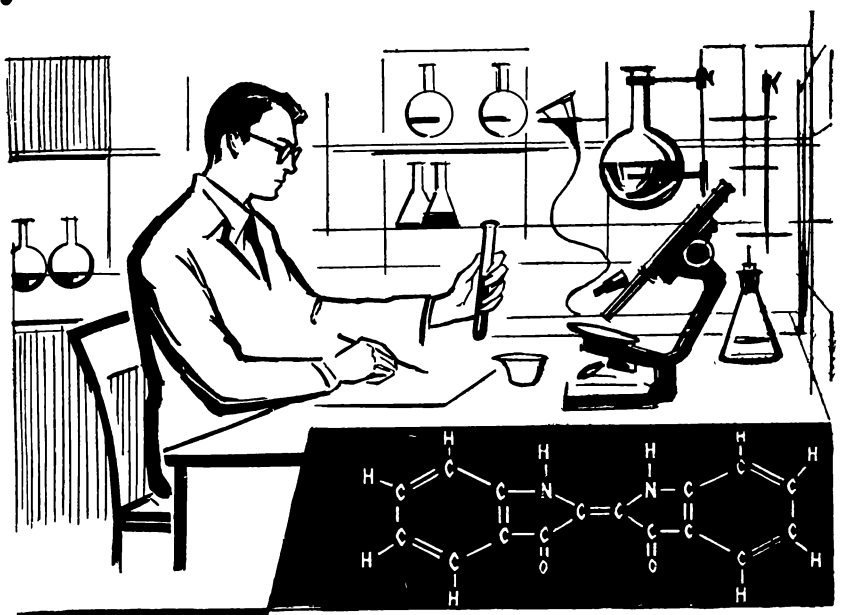
Тепер тисячі фарб найрізноманітніших відтінків і різноманітного призначення добувають на хімічних заводах. Кожний може купити пакетик фарби і, розчинивши її у воді, пофарбувати одяг у будь-який колір.

Хіміки насамперед взялися до вивчення будови молекул барвників. Німецькі капіталісти, які тут виявились сміливішими і далекоглядніші, ніж інші, не побоялись затратити мільйони карбованців на допомогу вченим, які почали досліджувати індиго і алізарин. Коли ж будова цих молекул була розкрита, відшукати способи штучного добування їх було вже не дуже важко. На ринок пішли величезні партії надзвичайно дешевих штучних індиго і алізарину, і розведення алізаринових та індигоносних рослин швидко припинилось.

Але хіміки зрозуміли своє завдання далеко ширше. Вони не тільки хотіли, наслідуючи природу, відтворити кращі її фарби. Вони почали пильно вивчати будову молекул природних барвників з метою з'ясувати, якими саме «архітектурними» особливостями, що надають їм властивостей барвників, вони відзначаються. І, в міру того як вони встигали у цьому, з'являлись один за одним нові барвники — десятками і сотнями, найрізноманітніших відтінків і призначення. Іноді це були продукти, тотожні з природними барвами, що перемогли останніх винятковою дешевиною. Здебільшого ж створювались цілком нові речовини, міцніші і красивіші.

При цьому побічно було добуто і стародавній пурпур. Але серед інших блискучих і гарних штучних фарб він здався таким непоказним, що промислового значення не дістав і спочатку його навіть не пізнали. А втім, штучний пурпур містить у своїй молекулі два атоми брому в трохи іншому розташуванні, ніж природний (див. рисунок). Але це не тільки не виявилось хибою, а, навпаки, було причиною лише більшої його досконалості. Природа злегка помилилась, як висловився один учений, у розміщенні атомів брому у пурпурі, і наука виправила її помилку.

Таблиця 48. Забарвлені в пурпурний колір тканини, зокрема мантії стародавніх володарів (верхній рисунок зліва), були набутком лише вищої знаті — імператорів і їх сановників; в середні віки забарвлення тканин барвником індиго було доступне теж тільки вищому станові суспільства — феодалам, багатим рицарям і іншим «власть імущим» членам суспільства (рисунок посередині). У наші часи канини, забарвлені будь-якими барвниками, доступні всім і кожному (нижній рисунок справа). Кожний барвник має свої «причіпні» групи атомів, які «зв'язують» його з забарвлюваним матеріалом. Доказом можуть служити досліди з занурюванням смужок паперу у фіолетове і червоне чорнило (рисунок вгорі справа), а також «проба пера» цим чорнилом (рисунок внизу зліва).



Будова молекули індиго; внизу — одна з індигоносних рослин.

Цікаво, що в природі молекули барвників часто побудовані за одним і тим же шаблоном і зовсім не використовуються інші невичерпні можливості. Молекула найчудовішої з фарб тваринного світу — пурпуру (див. рисунок на стор. 681) — дуже схожа на молекулу найкращої з фарб рослинного світу — індиго. Різниця лише в тому, що молюск, живучи в морській воді, яка містить, між іншим, і бромисті солі, «включає» в молекули свого організму такий рідкий елемент, як бром, а для рослин це недоступно.

Точно так само в дуже близькій хімічній спорідненості між собою є два найважливіші за своїм фізіологічним значенням пігменти рослинного і тваринного світу: хлорофіл — основна барвна речовина рослин і гемоглобін — барвна речовина крові. Але ці речовини не слід зіставляти з фарбами. Вони неперервно в роботі, від якої залежить існування органічного світу.

Дві перші штучні фарби — фуксин і мовеїн — було добуто в середині XIX ст. з однієї і тієї самої речовини аніліну, першу — в Росії Я. Натансоном, другу — в Англії Перкіним. Завдяки яскравості тонів, що їх давав мовеїн, він користувався протягом десятиліття широкою популярністю, незважаючи на те, що розцінювався на вагу платини. Особливо сильний поштовх новий вид промисловості дістав після відкриття М. М. Зініним способу дешевого добування самого аніліну з бензолу — одного з продуктів перегонки кам'яновугільної смоли. З цього часу кам'яновугільна смола з покидьків виробництва металургійного коксу перетворилась у дорогоцінну сировину промисловості штучних барвників, а самі ці барвники довгий час мали назву анілінових. З кам'яновугільної смоли добувають також антрацен — вихідну сировину для синтезу алізарину і споріднених з ним барвників.

Алізарин забарвлює матерію в яскраво-червоний колір. Такі матерії мають назву кумачу. Вони дуже гарні, але самий процес фарбування алізарином довгий, складний, кропіткий — дуже незручний у масовому виробництві. Тому тепер майже виключно вживають

Мільйони гектарів землі займали під рослини, з яких добували алізарин і індиго.

штучні фарби, яких немає в природі. Подивіться, як побудована молекула однієї з найпростіших — хризоїдину.

Вона складається з двох частин, сполучених між собою «містком» із двох зв'язаних атомів азоту (див. рисунок на цій сторінці). Цей місток і служить причиною того, що речовина забарвлена в оранжевий колір. Це — х р о м о ф о р, у перекладі — носій забарвлення. Частини молекули, скріплені містком з азотних атомів з подвійним зв'язком, бувають більш складними. Тому що хімік може перебудовувати і надбудовувати молекули, то відтінки і міцність виготовлюваних фарб знаходяться в його руках.

Хромофорами можуть служити (тобто надавати сполуці забарвлення) і деякі інші атомні сполучення з подвійним зв'язком. Але штучні барвники, в яких хромофор — це сполучення з двох атомів азоту, скріплених подвійним зв'язком (так звані а з о б а р в н и к и), найчисленніші. Вони відзначаються дешевиною, і серед них є представники всіх кольорів і відтінків. Найпростіші азобарвники — жовтого і оранжевого кольору. З ускладненням молекули з'являються нові кольори і відтінки — червоний, синій, фіолетовий аж до коричневого і чорного.

Але красивий відтінок і міцність — це ще не все для фарби. Адже не можна, щоб при першому ж пранні фарба начисто вимивалась з одягу! Щоб цього не трапилось, у молекулу вводять спеціальні групи атомів, що відіграють при фарбуванні роль своєрідних гачків або зачіпок. Для хризоїдину роль такого «гачка» виконують дві аміногрупи: NH_2 (див. рисунок).

Слід відзначити, що аміногрупи відіграють і іншу важливу роль: вони поглиблюють колір барвника. Якщо видалити їх із молекули хризоїдину (замінивши, наприклад, на атоми водню), то речовина з оранжевої стане жовтою. Тому такі групи, як аміногрупи, називають а у к с о х р о м а м и (посилювачами кольору).

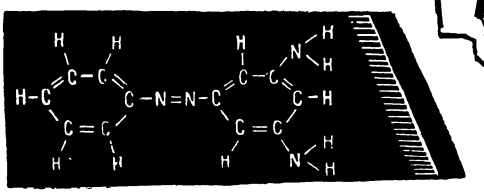
А втім, якщо ви замовите хімікові фарбу, він насамперед запитає, що саме ви збираєтесь фарбувати. Справа в тому, що успіх фарбування залежить не тільки від будови барвника, але і від хімічної природи тканини, а також способу фарбування.

Процес фарбування, тобто такої фіксації барвника волокном, при якій забарвлення не змивається водою і милом, дуже складний і не досить з'ясований. В одних випадках барвник удержується тканиною коштом сил адсорбції (точно так само, як активоване вугілля у протигазі затримує шкідливі гази). Прикладом може служити забарвлювання бавовни або паперу барвником конго-червоний. В інших випадках барвник утворює з тканиною хімічну сполуку.

Таким способом забарвлюють, наприклад, тваринні волокна (шовк і шерсть), що містять групи атомів основного характеру (NH_2), барвниками кислотного характеру, які містять кислотні групи SO_3H, COOH та ін., що відіграють роль «зачіпок».

Часто для міцної фіксації барвника волокном потрібна добавка так званих протрав, тобто таких речовин, які міцно зв'язуються одночасно і з барвником, і з волокном. Протравами найчастіше служать солі і гідрати окисів металів, наприклад оцтовокислий алюміній, солі заліза, хрому, олова.

Іноді, як, наприклад, при фарбуванні індиго, на волокно наносять розчинну у воді речовину (лейкооснову індиго). Змочену цим розчином тканину вивішують на повітрі і внаслідок окислення киснем повітря на самому волокні



Молекула хризоїдину. Місток в двох атомів азоту в подвійним зв'язком забезпечує красоту, а дві аміногрупи — міцність забарвлення.

утворюється нерозчинний у воді барвник індиго. Таке фарбування називають кубовим.

У молекулі природного алізарину немає досить надійних «гачків»; тому алізарин — протравний барвник. Проте якщо молекулі алізарину надати «причіпних груп» у вигляді сульфогруп — SO_3H, то ця хиба усувається. Утворюється нова фарба — кислотна алізаринова червона, яка міцно закріплюється на волокні.

Неважко переконатись на дуже простому досліді, яке значення мають «причіпні» групи для міцності зв'язку барвника із забарвлюваним матеріалом. Підвісьте над чорнильницею із звичайним (фіолетовим) чорнилом вертикально смужку паперу так, щоб вона була занурена в чорнило лише нижнім кінцем. Ви гадаєте, чорнило вбиратиметься папером і забарвлюватиме його? Нічого подібного! По паперу вгору підійматиметься чиста вода.

Зовсім інший результат буде при занурюванні папірця у червоне чорнило. Тут фарба підійметься по папірцю разом з водою, і границя її підйому лише трохи відстане від границі підйому води.

Після цього досліду вам стане зрозуміло, чому фіолетове чорнило не розпливається навіть на поганому папері, а червоне — розпливається. Звичайне чорнило — розчин штучної фарби (метилвіолету), яка має основний характер. Молекули фарби притягаються і удержуються волокнами целюлози. Червоне ж чорнило — розчин еозину. Еозин — кисла фарба. Тому її молекули не притягаються волокнами паперу і безперешкодно підіймаються по паперовій смужці разом з водою.

В результаті бурхливого розвитку органічного синтезу за які-небудь 50—60 років природні барвники були цілком витіснені синтетичними. Усі тканини, якими ми користуємось, увесь наш одяг забарвлені виключно штучними барвниками.

Найпоширеніші синтетичні барвники — азобарвники. Основним вихідним продуктом для їх синтезу служить анілін, що добувається за способом Зініна. Ним і забарвлюють не менш як 90% наших тканин. Тепер відомо кілька десятків тисяч азобарвників. Ось деякі з них: аніліновий жовтий, аніліновий чорний, оранжевий І і ІІ, міцний червоний А, конго-червоний, вікторія-фіолетовий.

Одні з найцінніших барвників — індигоїдні — родичі індиго. До них належить і пурпур, який тепер став дешевим. Великий клас утворюють так звані трифенілметанові барвники. Сировиною для їх синтезу служать анілін, фенол, нафталін і деякі інші речовини.

Ось деякі з цих барвників.

Аурамін — барвник жовтого кольору. Його у великих кількостях вживають для фарбування паперу, шкіри, штучного шовку, для добування лакових фарб.

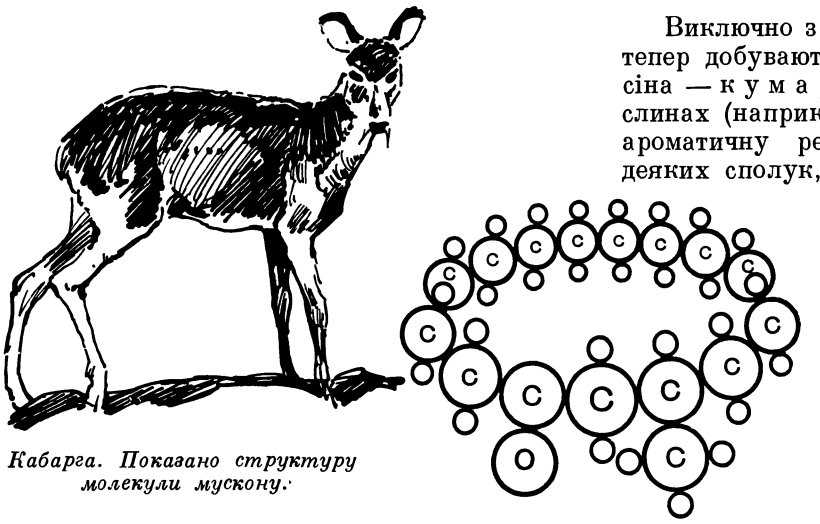
Кристалічний фіолетовий (кристалвіолет) служить для фарбування бавовни, штучного шовку, шкіри, для виготовлення фіолетового чорнила і «хімічних» олівців.

Флуоресцеїн дає в присутності лугів інтенсивне зеленувато-жовте забарвлення. Якщо у 40 *Т* води розчинити тільки один грам флуоресцеїну, то забарвлення вже видно. Завдяки такій сильній барвній здатності ним користуються для того, щоб простежити шлях підземних вод. Флуоресцеїн—вихідний матеріал для добування цілої групи барвних речовин. Його похідне еозин вживають для фарбування шерсті і шовку в чудовий рожевий колір.

Синтез алізарину послужив відправною точкою для штучного добування ряду схожих за своєю будовою алізаринових барвників. Вони дають оранжевий, каштановий, синій, чорний та інші кольори.

Дуже цікаві так звані індантренові барвники. Це синій індантрен, що вживається для фарбування бавовни і штучного шовку; жовтий флавантрен; дуже гарні фіолетового відтінку віолантрон і ізовіолантрон. Спочатку синтезували індантрен — з антрацену. Він так сильно нагадував індиго, що його називали «індиго з антрацену». Звідси і пішла назва «індантрен».

Забарвлені будь-якими барвниками тканини через деякий час тьмяніють і втрачають свій початковий колір. Якщо ж застосувати індантренові барвники, то цього не станеться. Вони мають дуже добру міцність і своєю довговічністю перевищують навіть забарвлену ними тканину. Більше того, вони витримують дію активних хімічних речовин при такій високій температурі, при якій будь-яка тканина миттю руйнується. Можна нагріти індантрен на повітрі до 470°, і він не зміниться. Можна кинути його у розплавлений луг, нагрітий до 300°,— він витримає і це випробування. Не піддається індантрен і дії міцної соляної кислоти, яка за кілька хвилин «пропалює» будь-яку тканину.



Кабарга. Показано структуру молекули мускону.

Виключно з допомогою органічного синтезу тепер добувають речовину із запахом свіжого сіна — кумарин, що зустрічається в рослинах (наприклад у маренці). Ваніл і н — ароматичну речовину ванілі — створюють з деяких сполук, що містяться у соку хвойних дерев. Із скипидару добувають терпінеол, що має запах бузку. Синтетичним шляхом можна добути також евгенол — масло із сильним запахом гвоздики, геліотропін — запашну речовину геліотропу, іонон — запашну речовину фіалки, коричний альдегід, що міститься в коричному маслі, і т. д.

Тепер парфюмерна промисловість використовує як запашні речовини суміші різних хімічних сполук, наприклад трояндове, конвалієве і фіалкове масла.

Деякі синтетичні запашні речовини не мають нічого спільного з однойменними речовинами, які зустрічаються в природі і дістали свою назву тільки завдяки схожості за запахом з природними речовинами.

Так, нітробензол названо гіркоміндалевим маслом (вживається для напахування туалетного мила); аміловий ефір оцтової кислоти — грушевою есенцією; етиловий ефір масляної кислоти — ананасною есенцією і т. д.

Ряд запашних речовин виготовляють із жирних кислот. Крім грушевої і ананасної есенцій, сюди належать, наприклад, аміловий ефір ізовалер'янової кислоти — апельсинова есенція і ізоаміловий ефір ізова-

Таку ж незвичайну міцність мають і інші барвники цього класу. Нічого подібного не знає природа!

Царська Росія не мала власної анілінофарбової промисловості. У країні існувало тільки 17 невеликих філіалів німецьких і швейцарських заводів, які переробляли на барвники імпортні продукти. Вони пильно охороняли свої виробничі таємниці. Тепер у нас створено потужну анілінофарбову промисловість, яка випускає десятки тисяч тонн найрізноманітніших барвників.

СИНТЕТИЧНІ ЗАПАШНІ РЕЧОВИНИ

У квітках містяться найважливіші природні запашні речовини. Їх можна добути з пелюсток способом перегонки з водяною парою. Так, наприклад, добувають трояндове масло з троянд. Із хвойних дерев добувають камфору, різні терпени (вид вуглеводнів) та інші запашні речовини.

Ще 50 років тому парфюмерна промисловість користувалась виключно природними запашними речовинами. Тепер широко вживаються синтетичні.

З бензолу і його похідних синтезовано багато речовин з приємним запахом: анетол, що має запах анісового масла, ментол — із запахом м'яти, тимол — із запахом чебрецевого масла.

Цивета. Показано структуру молекули цибетону.

лер'янової кислоти — я б л у ч н а е с е н ц і я. Ними користуються головним чином для того, щоб надати відповідного аромату різним прохолодним напоям, цукеркам.

Є природні запашні речовини і тваринного походження. З них найбільш рідкісні і дорогі — м у с к у с і ц и б е т. Мускус — темна речовина із сильним своєрідним запахом. Його добувають із залози самця кабарги — маленької дикої тварини з породи кіз, що зустрічається у гірських краях Азії. Щороку вбивають близько 60 тис. цих тварин, добуваючи з них майже 2 тис. *кГ* цінного мускусу.

Речовину, яка дає запах мускусу, називають м у с к о н о м. У мускусі його міститься усього близько 1%.

Цибет разів у три дешевший, ніж мускус. Його добувають із залоз африканських цивет — тварин із породи кішок. Запах цибетові надає речовина, що міститься в ньому — ц и б е т о н. Майже двадцять п'ять років тому було встановлено склад і будову молекул мускону і цибетону. Виявилось, що вуглецеві скелети молекул мускону і цибетону побудовані кільцеподібно. Тільки в мусконі кільце складається з 15 атомів, а в цибетоні — з 17 (див. рисунок на стор. 685). Незабаром мускон і цибетон були синтезовані. Разом з тим було синтезовано ряд інших речовин, що мають схожу будову.

Залежно від числа вуглецевих атомів у кільці змінюється і запах добутих речовин. Якщо кільце включає 5 вуглецевих атомів, то речовина має запах гіркого мигдалю, 6 — м'яти, 7—9 — камфори, 10—13 — кедра, 14—15 — мускусу. При дальшому збільшенні числа вуглецевих атомів запах зменшується і, нарешті, зникає зовсім.

ХІМІЯ ЖИТТЯ І ЗДОРОВ'Я

Коли з'явилась потреба у хімії як справжній науці, що об'єднує практичні відомості про перетворення речовин, виникло питання: чим же конкретно вона повинна займатись, у чому повинна допомагати людям? Тоді ж зроблено було спробу обмежити завдання хімії тільки допомогою лікарям у вигляді виготовлення різноманітних ліків і зілля. Але для незміцнілої науки таке завдання, як виявилось, було надсильне. Лише багато пізніше стало можливим, з достатньою надією на успіх, взятися і до тих завдань, які зв'язані з лікуванням людей.

Зв'язок між будовою молекули будь-якої речовини і дією її на живий організм був настільки складний, що планомірна робота по винайденню лікарських речовин, так звана раціональна хіміотерапія, усякого іншого часу не змогла б подолати труднощів, що зустрічаються на шляху. Тим більше передчасно було нав'язувати хімії медичні цілі тоді, коли вона тільки виходила із мороку алхімічних підземель.

ОСОБЛИВОСТІ ДІЯННЯ РЕЧОВИН НА ЖИВИЙ ОРГАНІЗМ

Про труднощі, надзвичайно характерні саме для даної галузі хімічного синтезу, корисно скласти наочне уявлення раніше, ніж знайомитись з її чудовими досягненнями.

Перша трудність полягає у тому, що живий організм є особливо розбірливим до навіть найнезначніших змін у будові молекули речовини, про що вже згадано було в описі мандрівки у світ, відображений у дзеркалі. Ось характерний приклад.

До числа речовин, які існують у вигляді двох оптичних ізомерів, належить адреналін. Інакше кажучи, існує не один, а два адреналіни (рис. 2 — кольорова таблиця на стор. 688). Один називається лівим, другий — правим. Обидва мають одну і ту саму структурну формулу, однакові за зовнішнім виглядом, у них одна і та сама питома вага, одна і та сама точка плавлення, розчинність та ін. І все-таки це дві різні речовини, і вони по-різному діють на живі організми (докладніше про такі речовини сказано у статті «Органічні речовини навколо нас»).

Адреналін відіграє дуже важливу роль у хімічному «господарстві» тваринних організмів. Його широко вживають лікарі при спаді кров'яного тиску, ослабленні діяльності серця і в багатьох інших випадках.

Адреналін був синтезований хіміками усього через чотири роки після його виділення у вигляді безбарвних кристалів із надниркових залоз бика. Але синтетичний адреналін виявився удвоє слабшим за дією, ніж природний. Чому? Тому, що при хімічних реакціях утворюються і ліві, і праві його молекули, при-

чому ті і другі — в однаковій кількості. Діють же на симпатичну нервову систему тільки молекули одного виду.

Отже, живий організм буває іноді надзвичайно розбірливим і чутливим до найменших змін у будові молекул речовин, з якими він зустрічається. Це — одна з особливостей дії речовин на живі організми. Інша особливість полягає у незвичайній іноді силі дії. Той же адреналін виразно діє і при введенні його в кров у концентрації усього 1 : 1 000 000 000.

Інший приклад — тироксин (рис. 1 — кольорова таблиця на стор. 688), що виробляється у щитовидній залозі ссавців. У 1927 р. його добули штучно. В результаті виникла можливість детально досліджувати дію тироксину на живі організми. Виявилось, що впорскування десятої, навіть сотої частки міліграма тироксину у кров пуголовків надзвичайно прискорює перетворення їх (як і будь-якої іншої личинкової форми тварин) у дорослу форму. Тому що нагромадження речовини в організмі пуголовка не встигає йти за ненормальною швидкістю перетворення, утворюються дивовижні «карликові» породи жаб.

Хімія прийшла на допомогу медицині, давши їй спочатку ліки, добуті випадково (наприклад хлороформ). Потім вона стала на шлях синтезу лікарських речовин, що містяться у природних (рослинних і тваринних) матеріалах. Нарешті, шляхом синтезу створено було нові сильнодіючі ліки, які не існують у природі в готовому вигляді. Раціональна хіміотерапія не змогла б виникнути, якби структурна теорія не освітила шляху до неї.

МОЛЕКУЛИ ПРОТИ МІКРОБІВ

Більшість найбільш руйнівних хвороб, що уражують людину, виникає в результаті проникнення в її організм різних мікробів.

Важливою подією в історії медицини була перша операція із застосуванням антисептичної — знезаражуючої — речовини, зроблена англійським хірургом Лістером. Антисептиком послужила карболова кислота — один з продуктів сухої перегонки кам'яного вугілля. До введення в хірургію антисептиків навіть легкі операції приводили іноді до смертельного кінця внаслідок зараження рани мікробами. Тепер же ця загроза розсіялась, і смертність від хірургічних операцій швидко і різко знизилась.

Так здобуто було один з перших успіхів у відбитті наступу мікробів на підступах до живого організму. Але до знищення бактерій, які вже проникли в організм, було ще дуже далеко. Карболова кислота, вбиваючи мікробів, не милувала і живу тканину. Природно, виникла ідея так «відрегулювати» молекулу лікарської речовини, щоб, «стріляючи» в мікроба, не «попасти» у живу людину.

Близько 300 років тому в Європу вперше привезли кору хінного дерева, якій багато хто зобов'язаний був вилікуванням від згубної пропасниці. З кори виділено було її цілюще начало — хінін — білий гіркий порошок. Згодом хіміки розгадали будову молекули хініну, потім добули його штучним шляхом. Але дешевих способів синтезу хініну не знайдено ще й досі.

Зате дослідження дії чистого хініну на хворих-маляриків відкрило шлях раціональній хіміотерапії. У 1860 р. російський лікар Романовський, розглядаючи в мікроскоп краплю крові хворого на малярію, який проходив курс лікування хініном, побачив, як руйнуються тіла бактерій від дії ліків. У цьому дослідженні народилась основна формула раціональної хіміотерапії: кращими ліками проти всякої хвороби буде та речовина, яка завдасть найменшої шкоди організмові хворого і спричинить найбільші руйнівні зміни у хвороботворному мікробі.

Природно, у хіміків виникло питання, чи досить молекула хініну відповідає цій умові і чи не потребує вона удосконалення. Дію хініну вдалося видозмінити і почасти посилити шляхом деяких змін у молекулі (рис. 3 — кольорова таблиця на стор. 689). Увагу хіміків було звернуто на найбільш доступну для перебудови частину її, позначену буквою А. Сюди можна прилучити через атом кисню ланцюжок з будь-якого числа вуглецево-водневих ланок.

І ось що виявилось. Якщо молекула складається з двох ланок, то утворюється хімічна зброя проти однієї різновидності наших невидимих ворогів, так званих пневмококів, які забираються звичайно в легені і спричиняють там запальні процеси. Варто збільшити число ланок до 5, і ми дістанемо засіб, який мало діє на пневмококів, зате надзвичайно активний проти збудників бешихи та інших шкірних захворювань. Ще одна «прибудова»: прилучаються 8 ланок — і виникає новий лікарський засіб (вуцин), згубний для стрептококів. При дальшому нагромадженні ланок

бактерицидна дія вупину зникає, молекула «зіпсована».

Великий німецький учений Ерліх, який багато працював над винайденням засобів для загоєння ран, недарма порівнював часто відношення ліків до живої речовини з відношенням ключів до замків. Удосконалені хімією молекули хініну цілком можна порівняти із звичайним ключем, від числа зарубок на якому (відповідно до числа вуглецево-водневих ланок у «хвості» молекули) залежить, відімкне чи не відімкне він даний замок. Через наші руки можуть пройти тисячі ключів, раніше ніж ми знайдемо той, який потрібний.

Антисептики подібні до вагороджувального вагону, що відбиває натиск ворога на підступах до фортеці.

Так, виходячи із структурної формули хініну, в лабораторіях хіміків створені були нові ліки, що вбивають хвороботворні мікроорганізми і не шкодять живій тканині.

Ну а малярія, у боротьбі з якою закладені були основи раціональної хіміотерапії?

Керуючись загальною ідеєю «архітектурного» плану молекули хініну, спочатку у Німеччині В. Шулеман, потім в СРСР О. Ю. Магідсон створили чисто синтетичні протималярійні препарати — п л а з м о х і н і п л а з м о ц и д. Вони рівноцінні з природним хініном і майже цілком замінили його в нашій країні.

Наведена на рис. 4 (кольорова таблиця на стор. 689) структурна формула одного з них (плазмохіну) показує, в якій близькій спорідненості є штучні протималярійні ліки з природним хініном (спільну для всіх них частину молекули виділено рамкою).

ВІД ФАРБ ДО ЛІКІВ

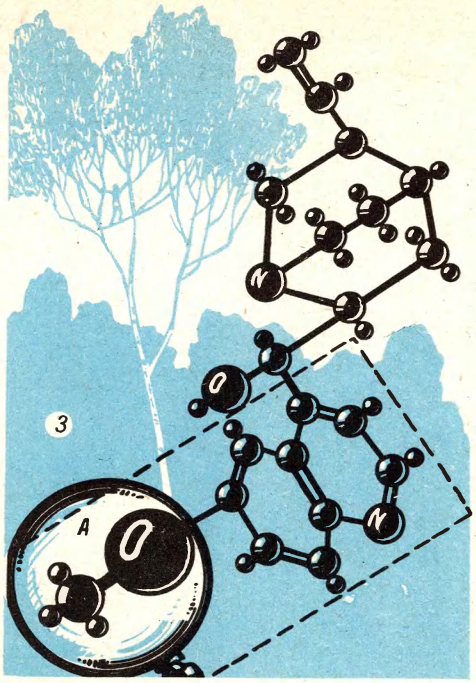
Перше місце тепер серед хімічних засобів боротьби з мікробами займають так звані с у л ь ф а н і л а м і д н і п р е п а р а т и. Історія їх повчальна. Працюючи над ними, ще на самому початку XX ст. хіміки зовсім не думали про здоров'я людей. Вони шукали нових шляхів синтезу барвників, причому брали як вихідний продукт сульфанілову кислоту — надзвичайно зручну речовину для найрізноманітніших перебудов.

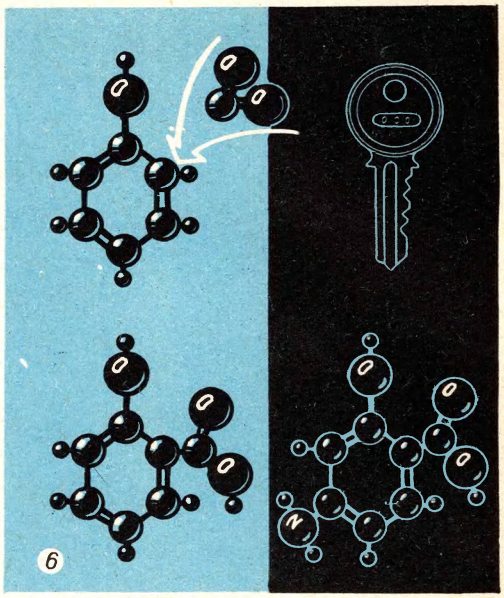
Шукання нових барвників увінчались блискучим успіхом. Але до 1935 р. ніхто не підозрював, що продукти, які утворюються при цих синтезах, являють собою грізну зброю проти найшкідливіших мікробів. Коли ж це виявилось, шукання набули нового напряму. Хіміки вступили тепер у тісне співробітництво з лікарями. Перші синтезували один сульфаніламідний препарат за одним і передавали їх до рук медиків. І лікарі зразу ж бралися до перевірки дії нового препарату на штучно заражених різними мікробами тваринах. Масштаби роботи були величезні. Один за одним синтезували багато тисяч препаратів, щоб відібрати з них десяток-другий таких, що найбільш успішно діють. Тепер всім відомі назви багатьох таких речовин: с у л ь ф і д и н, с т р е п т о ц и д, с у л ь ф а з о л, с у л ь ф о д и м е з и н та ін. Усі вони добуваються з сульфанілової кислоти шляхом заміщення в ній водню (помічено зірочкою) на той чи інший радикал (рис. 5 — кольорова таблиця на стор. 689).

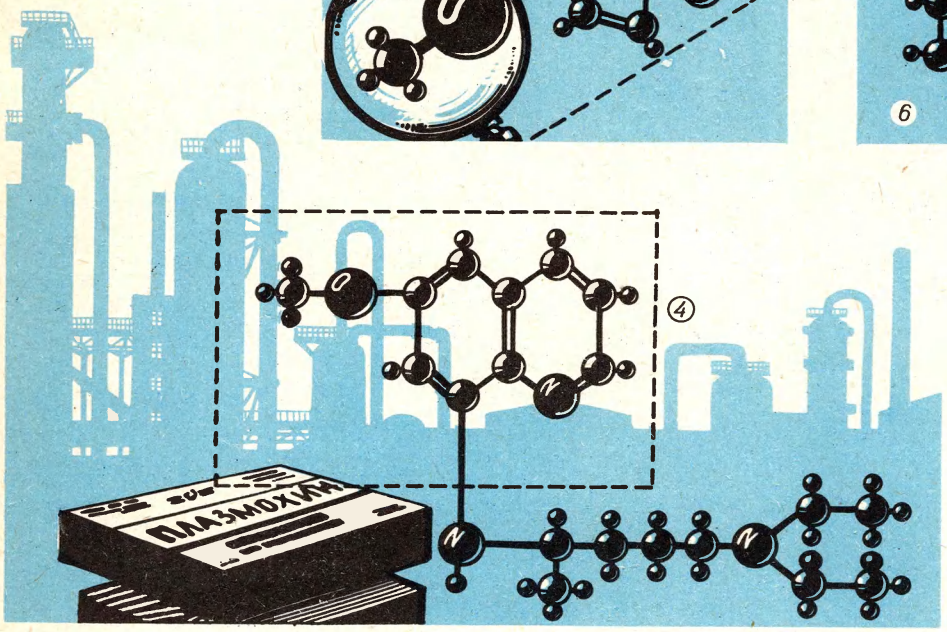
Знання будови молекул допомогло хімікам не тільки створити нові ліки, але й зрозуміти, як саме ці ліки діють. Мікроби, як і люди, потребують вітамінів. Таким вітаміном для них служить п а р а а м і н о б е н з о й н а к и с л о т а. Вона є в нашій крові у мізерних кількостях. Якби її не було зовсім, мікроби, що поселились у нас, не загинули б, але перестали б розмножуватись.

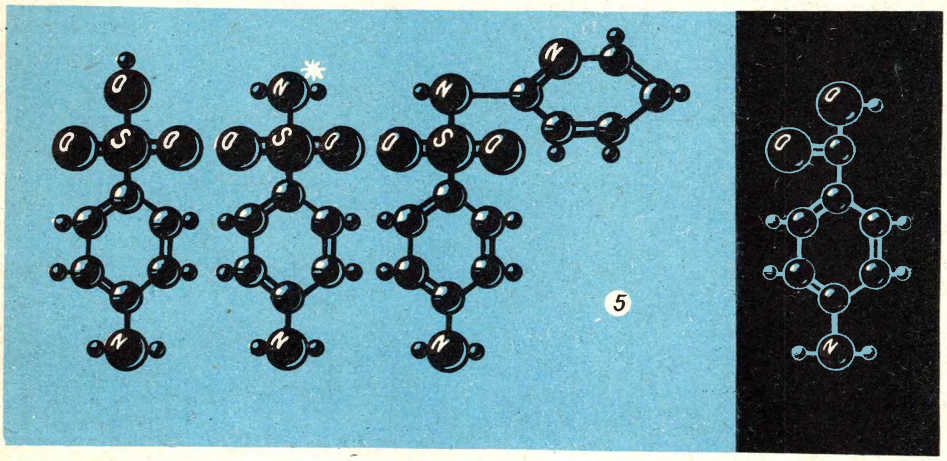
Тепер порівняйте будову молекул цієї кислоти і сульфанілової. Схожість їх впадає в око. Ми вже порівнювали відношення ліків до живих організмів з відношенням ключів до замків, які вони відмикають. Уявімо собі, що

1. Тироксин і спричинене ним перетворення аксолотля (зліва) в амблістому (справа). Буквами позначено атоми йоду, азоту та кисню. *2.* Лівий і правий адреналін.









3. Хінне дерево і структура хініну. *4*. Плазмохін. Спільна для плазмохіну і хініну частина молекули взята в рамку. *5*. Послідовно представлені структури молекул: сульфанілової кислоти, її аміду, сульфідину, а на чорному фоні — параамінобензойної кислоти. *6*. У молекулу фенолу («карболки») заглиблюється молекула вугільного ангідриду (угорі); утворюється саліцилова кислота (унизу); ще одна прибудова — і перед нами ПАСК (на чорному фоні).

молекула параамінобензойної кислоти — це справжній ключ, а молекула сульфідину — підроблений ключ. Він увійшов у замочну щілину, але не відкрив замка, а застряв у ньому так міцно, що його не можна відкрити і справжнім ключем. Приблизно так ми і уявляємо собі вплив сульфамідних препаратів на мікробів.

Як користуються сульфамідними препаратами?

Насамперед важливо застигнути хворобу на самому початку, поки бактерії не встигли ще надто сильно розмножитись і організм спроможний справитись з ними своїми силами. Далі потрібно підтримувати в організмі достатню концентрацію ліків, щоб він міг розправитись з паралізованими або ще живими мікробами. Тоді одужання забезпечене.

Якщо мікроб не потребує параамінобензойної кислоти, то він не піддається дії сульфаніламідних ліків і шукання хімічної зброї проти нього повинне йти в іншому напрямі. Так було створено ПАСК — препарат, який зупиняє ріст і розмноження смертоносної туберкульозної палички. Ще на початку XIX ст. була відома цілюща дія саліцилової кислоти при ревматизмі. Але поки її з великими труднощами добували тільки з рослинної сировини, вона була мало доступна. У 1874 р. німецький хімік Кольбе знайшов простий спосіб перетворення в саліцилову кислоту фенолу шляхом впровадження в його молекулу молекули вугільного ангідриду (рис. 6— кольорова таблиця на стор. 689). Це був перший синтез природної лікарської речовини, з якого почалось промислове виробництво як самої саліцилової кислоти, так і інших ліків, що утворюються шляхом ускладнення її молекули. Це аспірин, що вгамовує біль і знижує жар, салол, що дезинфікує кишечник, та ін. Як зброя проти мікробів сама саліцилова кислота мало ефективна, але в числі її похідних був і ПАСК.

Порівняйте його з параамінобензойною кислотою, і вам знову впаде в око схожість у будові молекул тієї і другої речовини. Внаслідок цього до ПАСКу можна прийти і від саліцилової, і від параамінобензойної кислоти.

Другий шлях легший, і йому віддають перевагу, тому що сама параамінобензойна кислота легко синтезується з толуолу, одного з продуктів коксування вугілля.

Як вітамін параамінобензойна кислота потрібна не тільки мікробам: без неї порушується пігментація волосся у людини, шерсті у тварин, пір'я у птахів. З неї ж, крім ПАСКу, виробляють анестезин і новокаїн. Ці речовини теж варті уваги не своєю дією на мікробів, а дією на організм. Вони тимчасово відключають нерви, що посилають у мозок сигнали болю, від мозку, в якому відчуття болю народжується. Людина, що її оперують, перебуває у повній свідомості, вона все бачить і чує, але не відчуває навіть дотику скальпеля хірурга до свого тіла.

Для місцевої анестезії вперше був застосований кокаїн — природний продукт, що добувається з листя тропічного чагарника кока. Але застосування кокаїну в медицині обмежене внаслідок високої його токсичності. Тому лише після заміни кокаїну синтетичним продуктом — новокаїном — проблема місцевої анестезії була радикально розв'язана.

Так творча хімія відіграла вирішальну роль у розв'язанні двох основних завдань хірургії: обезболювання операцій і захисту операційної рани від попадання інфекції.

СНОТВОРНІ ЛІКИ

Не всі хвороби спричиняються вторгненням в наш організм мікробів. Багато хвороб спричиняється порушенням нормального ходу тих чи інших природних процесів, з яких складається життя. І тут творча хімія, спираючись на дослідження будови молекул, прийшла на допомогу медицині.

Наш організм має потребу в періодичному повному відпочинку, який ми називаємо сном. На щастя, не так вже багато людей зазнало на собі, яке нестерпне порушення потреби організму в сні і до яких важких наслідків воно приводить. Але тільки ці нечисленні люди можуть оцінити, яким благодіянням було відкриття снотворної дії барбітурової кислоти.

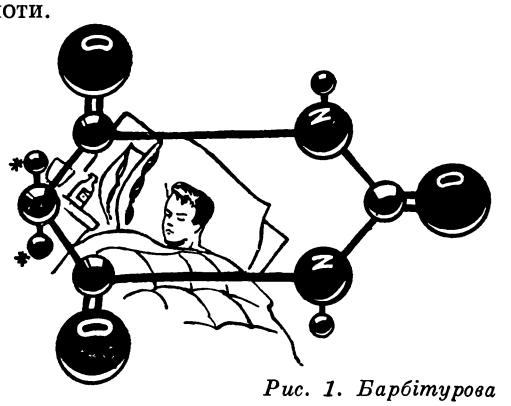


Рис. 1. Барбітурова кислота.

Як звичайно зірочкою (рис. 1) ми позначили атоми, що особливо легко заміщуються іншими атомами або атомними групами. І замість одного лікарі дістали з рук хіміків цілий набір снотворних речовин. Одні з них діють зразу ж після прийому, але спричиняють короткочасний сон, інші, в тому числі веронал, спричиняють сон середньої тривалості. А такі, як л ю м і н а л, вживають для лікування тривалим сном.

ЖИТТЄВІ КАТАЛІЗАТОРИ

Ще у 1880 р. російський дослідник М. І. Лунін зробив разючий дослід. Він розсадив білих мишей у дві клітки і призначив одним молочну дієту, інших же годував штучним молоком, складеним з очищених речовин, що входять до складу натурального молока,— казеїну, жиру, молочного цукру і солей. У першій клітці миші почували себе чудово, у другій — гинули одна за одною. Висновок напрошувався сам собою: очевидно, в натуральному молоці, крім перелічених, є в мізерній кількості якісь невідомі речовини, такі потрібні для життя.

Згодом ці речовини названі були в і т а м і н а м и. Недостача їх у їжі приводить до тяжких захворювань і до загибелі тварин і людей. Найдивніше у вітамінах те, що вони спричиняють свою дію, коли знаходяться в їжі в найдрібніших кількостях, що ледве вловимі для хімічного обліку. Добова потреба людини в тому чи іншому вітаміні виражається міліграмами або навіть частинами міліграма. Організм тварин і людини сам не виробляє вітамінів, а запозичає їх з рослинної їжі.

Отже, перед хіміками постало звичне завдання: добути із рослинного продукту вітамін, що міститься в ньому, встановити його структурну формулу і, керуючись нею, синтезувати його з будь-яких дешевих і доступних матеріалів. При цьому найменша помилка у встановленні структури молекули вітаміну або найменша неточність у відтворенні цієї молекули штучним способом приводить до того, що вся величезна праця пропаде даремно.

Який же підсумок? За останні 15—20 років встановлено хімічну природу більш як півтора десятків найпотрібніших для людини вітамінів. Ці дорогоцінні речовини, дуже скупо розсіяні в природі, тепер тоннами виробляються на заводах.

У минулому спалахи а в і т а м і н о з і в — хвороб, що зумовлюються вітамінним голодом,— були звичайним явищем під час воєн і в арміях, і серед мирних жителів. Ще й тепер авітамінози уражують незаможні верстви населення навіть у таких багатих капіталістичних країнах, як США. У Радянському Союзі масових авітамінозів немає. У цій перемозі видатна роль належить нашій хімії.

Вітаміни — нове чудове підтвердження надзвичайної чутливості живого організму до хімічних впливів. У чому ж тут справа? Можливо, здивування буде хоч би почасти розвіяне з допомогою однієї аналогії з технікою. В різних її галузях, особливо в електротехніці, широко застосовують реле (див. т. 5 ДЕ). Такими «хімічними реле» щодо живого організму і служать вітаміни.

Схожу з вітамінами роль в нашому організмі відіграють г о р м о н и. На самому початку статті ми познайомились з двома із них — адреналіном і тироксином.

Гормони — це хімічні регулятори життєвих функцій нашого організму. Припустимо, що раптово вас щось сильно злякало чи розсердило. Зразу за сигналом з мозку надниркова залоза видавлює в кров незначну краплинку адреналіну. Під його впливом тонкі кровоносні судини, що доставляють кров м'язам рук і ніг, розширюються, серце починає битися прискорено і сильно, і таким чином весь організм приводиться до стану готовності енергійно реагувати на небезпеку, що загрожує йому.

На відміну від вітамінів гормони не надходять у тваринний організм іззовні. Вони виробляються в самому організмі, у спеціалізованих «фабриках» — залозах внутрішньої секреції. Зрозуміло, що потреба в тому чи іншому гормоні у тварини і людини може виникнути тільки у випадку порушення нормальної діяльності відповідної залози. І це трапляється.

Поки гормони не почала вивчати творча хімія, ці речовини, як і вітаміни, добували з величезними труднощами з організмів тварин. При цьому доводилось переробляти багато тонн сировини, щоб добути міліграм гормона — стільки, скільки важить шпилькова головка. А коли було встановлено будову їх молекул, то стало порівняно легко знаходити шляхи штучного їх добування. Нині гормони вживають для лікування багатьох хвороб, у зоотехнії — для підвищення продуктивності сільськогосподарських тварин.

Минуло трохи більше як сто років після того, як науковий світ приголомшений був звісткою, що штучним шляхом у звичайній хімічній колбі вперше добуто органічну речо-

вину — сечовину. І ось сьогодні — вже не в окремих колбах, а в реакторах хімічних заводів — добувають ряд вітамінів і гормонів — речовин, які беруть найбільш безпосередню, найбільш діяльну участь у життєвому процесі!

НА ШЛЯХУ ДО ШТУЧНОГО СТВОРЕННЯ ЖИТТЯ

Ми давно перестали бачити щось особливо дивне в тому, що багато продуктів лабораторії тотожні з тими чи іншими утворами природи. Швидше ми схиляємось захопитись ідеєю створення речовин, яких у природі немає і не може бути.

Але в одній галузі вмілість людини відстала від вмілості природи. Тут ми ще залишаємося наслідувачами і учнями. Хімік може штучно створювати найбільш важливі різновидності речовин, які беруть безпосередню участь у життєвому процесі,— жири і вуглеводи. Він наблизився до розуміння таємниці білкових речовин, з яких складаються мозок, м'язи, шкірні покриви — увесь організм людей, тварин та інших живих істот, аж до мікробів. Найпростіші з білків вже відтворено в лабораторії.

Практичне значення відкриттів у цій галузі науки повинне бути особливо цінним, здавалось би, для харчової промисловості. Вміння створювати основні харчові речовини, виходячи, якщо потрібно, з елементів, могло б, здавалось би, перевернути усю справу харчування. Але природа доставляє нам білки, жири і вуглеводи за незрівнянно дешевшу ціну. Адже живі організми — найскладніші «фабрики», що виникли не за один чи два роки, а створились за мільйони років розвитку життя на Землі. Дуже втішне вже й те, що в разі потреби ми вміємо ці «фабрики» обслуговувати і керувати ними.

Білки входять до складу нашого організму у вигляді масивних молекул з величезними молекулярними вагами, приблизно від 10 тис. і до кількох мільйонів кисневих одиниць. У нашому тілі містяться тисячі різних білків, кожний з яких має свою особливу будову, яка дозволяє йому здійснювати своє особливе завдання у життєдіяльності організму.

При кип'ятінні з лугами і кислотами величезні молекули білків розщеплюються на дрібніші молекули амінокислот — так погано сковані ланцюги розпадаються на окремі ланки. Амінокислоти і є тими ланками, з яких складаються молекули усіх білків. На рис. 2 показано структуру молекули найпростішої з амінокислот, так званого гліцину. У рамки вміщено те групування атомів, яке зберігається в усіх білкових амінокислотах. Решта з числа усіх 24 природних амінокислот, на які розщеплюються природні білки, різниться від цієї тільки тим, що один із водневих атомів заміщений тією чи іншою нескладною групою атомів.

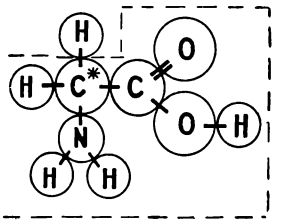


Рис. 2.

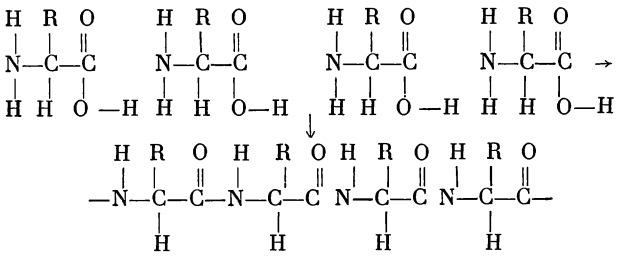
Це заміщення має вартий уваги наслідок: помічений зірочкою атом вуглецю стає асиметричним. Але особливо дивне інше. Яке б не було джерело природної амінокислоти—будь-який рослинний чи тваринний вид, будь-який вид бактерій і навіть будь-який вірус,— молекули всіх природних амінокислот виявляються, умовно кажучи, лівими; правих амінокислот у живій природі майже не зустрічається. Тепер вам зрозуміло, чому у світі, відображеному у дзеркалі, ми повинні були б загинути голодною смертю (див. статтю «Органічні речовини навколо нас»). Це сталось би через відсутність у їжі білків, молекули яких складаються з лівих амінокислот. Адже при відображенні у дзеркалі молекули природних білків з лівих перетворились би у праві.

Те, що відбувається з білками в хімічній колбі, відбувається і в природній «колбі» — у шлунку: білки розщеплюються в ньому на амінокислоти. Маленькі молекули амінокислот легко проникають крізь стінки шлунка в кров'яне русло і розносяться по тканинах організму, де знову зчеплюються в молекули білків. Отже, нам не обов'язково харчуватись білками, можна харчуватись і безпосередньо амінокислотами? Не обов'язково навіть, щоб білкова їжа попадала у шлунок, можна впорскувати розчин амінокислот прямо в кров? Не тільки можна, але лікарі так і роблять, коли пацієнт хворіє на настільки глибокий розлад травлення, що його шлунок відмовляється перетравлювати білкову їжу.

Не обов'язково, щоб в амінокислотній дієті були всі 24 природні амінокислоти. Ми маємо потребу лише в дев'яти з їх числа, решту 15 наш організм може виготовляти для себе сам. Нижчі ж організми здатні виготовляти для себе всі потрібні амінокислоти з неорганічних речовин.

Білкова їжа повноцінна, коли в ній містяться всі необхідні амінокислоти. Таким є сир. Якщо в білковій їжі не вистачає тих чи інших необхідних для людини амінокислот, вона неповноцінна. Наприклад, у желатині — білку, що утворюється в результаті виварювання кісток,— не вистачає трьох із числа необхідних людині амінокислот.

Зчеплення молекул амінокислот у ланцюгоподібні молекули білка здійснюється в тканинах нашого організму внаслідок відщеплення води:



В одних випадках молекули білка, що утворюються, уподібнюються до нитки, згорнутої в клубок (такі молекули утворює, наприклад, білок курячого яйця), в інших випадках збе-

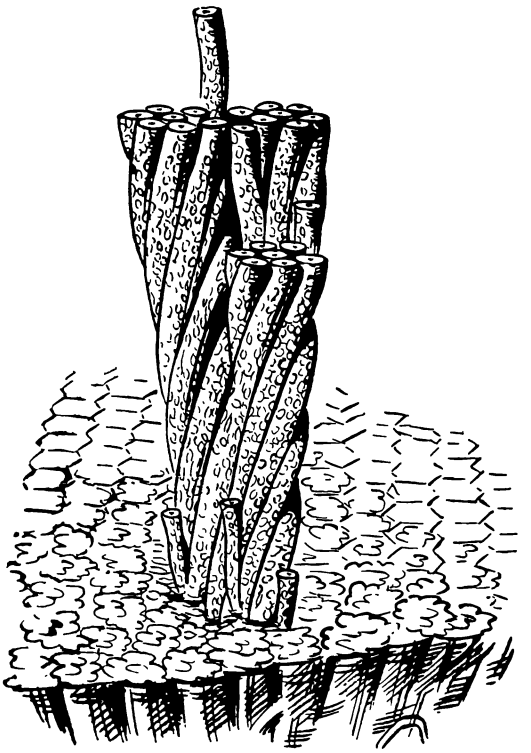


Рис. 3.

рігають витягнуту форму. Така молекула нагадує довгу пружинку (рис. 4). З молекул-пружинок, скручених одна з одною, як дротинки у кабелі чи тросі (рис. 3), складається наше волосся, нігті, м'язи і інші волокнисті тканини нашого організму. Ці молекули справді мають відмітну властивість пружини: вони можуть розтягуватись до довжини, яка удвоє перевищує їх нормальну довжину, і стискуватись знову, як тільки розтягуюча сила перестає діяти.

Здовження пружиноподібних молекул білків відбувається не тільки при розтягуванні, але й при зволоженні. На цьому побудовано дію волосяного гігрометра. Це звичайний волос, натягнутий важком і перекинутий через рухоме коліщатко. Коли повітря в кімнаті стає більш вологим, волос здовжується, повертає коліщатко і вістря прикріпленого до коліщатка покажчика переміщується по шкалі.

Хімік вводить розщеплений білок у прилад-автомат і через добу без дальшої своєї участі дістає готовий результат аналізу у вигляді графіка, записаного на стрічці. Але далі постає головоломно складне завдання: перетворити дані аналізу в структурну формулу. До кінця вдалося розв'язати його лише для одного з тваринних білків-гормонів — інсуліну. Молекула цього білка складається з 51 ланки, представленої 15 амінокислотами. Структурна його формула ледве вмістилась би на сторінці цього тома. І ось що дивне: послідовність зчеплення амінокислотних ланок — точно одна і та сама в інсуліні, добутому з таких різних видів тварин, як свиня і кит.

Штурм проблеми штучного білка, розпочатий свого часу німецьким ученим Фішером, триває у різних напрямах. Але і тепер хімія так само далека від розв'язання завдання добування білків заводським способом, як і в часи праць Фішера.

Таким чином, сучасний стан речей не дозволяє особливо сподіватись на докорінне перетворення у найближчому майбутньому сучасних способів харчування.

Успіхи в справі штучного відтворення природних білків цікавлять нас головним чином із зовсім іншого боку. Адже ці успіхи в якійсь мірі наближають нас до розв'язання найбільшого теоретичного і практичного завдання — до штучного створення життя.

При штучному відтворенні білків не обійшлось без розчарувань. Багато хто вважав, що створити білок — це і значить створити життя. Проте виділено велику кількість білків, всі

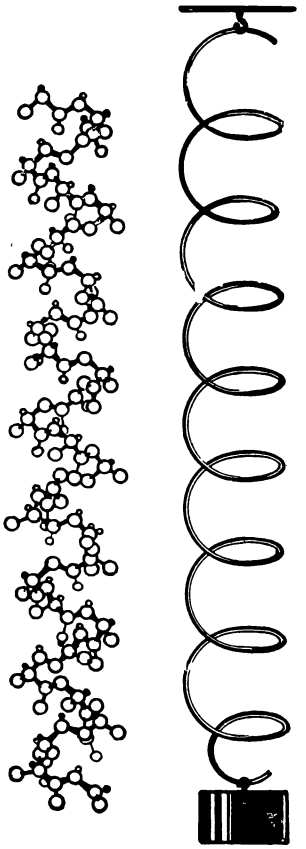


Рис. 4

вони чудово зберігаються в хімічних пробірках, багато — у вигляді дуже гарних кристалів, але ознак життя у них так само мало, як у цукрі чи крохмалі. Проте у нас лише зміцніла впевненість, що з'ясування переходу від «неживого» до «живого» становить мету, доступну саме хімічному дослідженню.

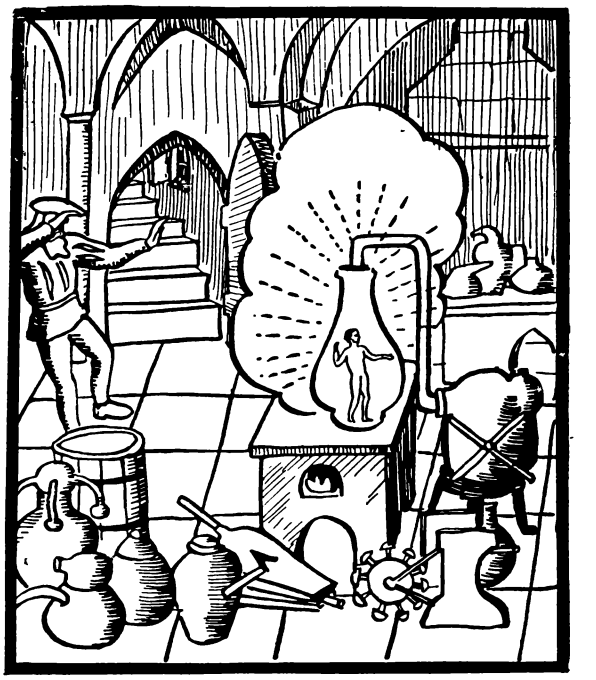
Хімік звертається до біолога із запитанням: якими властивостями потрібно наділити молекулу, щоб вона дістала здатність «жити»? Тоді вже його, хіміка, справа гадати, які сполучення атомів для утворення цих властивостей потрібно створити.

Багато хто не погоджується з такою постановкою завдання. Вони вважають, що життя має нехімічне начало, що воно почалось не з молекули, а з якогось вже досить складного сполучення молекул, тому що кожний живий організм має не тільки певний хімічний склад, але й певну організацію. Докладніше обміркування цих думок матиме рацію тільки тоді, коли ми точно визначимо, що саме розуміємо під словом «жити».

Для того щоб вирішити, що розглядуваний об'єкт — саме жива істота, ми повинні встановити у неї одночасну наявність ряду властивостей. Якщо ж ці властивості вдасться сполучати в одній молекулі, то чи не стане ця молекула живою? Створюючи фарби, хімік саме так і сполучає в одній молекулі властивість бути забарвленою, властивість зчеплюватись з волокном і т. д.

Ставлячи так завдання штучного створення життя, ми не сподіваємося, як алхіміки, що з хімічної колби вискочить готовий гомункулус — маленька жива людинка. Адже живі істоти, крім усього іншого, мають за собою мільйони років історії, і ми навряд чи зможемо перескочити через цю велику безодню часу. Ми можемо сподіватися лише створити дещо таке, що саме собою при сприятливих умовах перетворилось би через нові мільйони років у рослини, тварини чи щось подібне до тих і інших.

Чи буде це штучно створене «дещо» речовиною чи якоюсь надпростою істотою? Протягом багатьох років пильна увага вчених прикута до світу живих істот, недоступних навіть для найсильніших мікроскопів. Таким є бактеріофаг — «пожирач бактерій». Дію бактеріофага вперше описав російський учений М. Ф. Гамалея ще у 1898 р. Це такий же паразит щодо бактерій, як бактерія щодо людини. Бактеріофаги є скрізь, де є бактерії: у тваринних організмах, у воді рік, озер, морів і т. д. Вони виділені і з продуктів, не заражених бактеріями: з часнику, цибулі, яблук, моркви. Бактеріофагів вдалось спостерігати лише з допомогою ультрамікроскопа і електронного мікроскопа. Це інструменти такої потужної розрізнювальної сили, що для них вже доступні найкрупніші молекули. Отже, бактеріофаги мають розміри масивних молекул! Це матерія у стані роздробленості на молекули. Але ця матерія живе, тобто живиться і розмножується, зберігаючи



Так алхіміки уявляли собі штучне створення життя

свої природжені властивості, і плями її культури поступово захоплюють усю поверхню поживного середовища. Навколо бактеріофагів розгорнулась пристрасна дискусія. На думку одних, бактеріофаг — це речовина, на думку інших,— жива істота. Але чи не є він і те і друге одночасно, тобто різновидність шуканої живої першоматерії?

До бактеріофагів в усьому, крім умов існування, подібні віруси — ультрамікроскопічні збудники заразних хвороб, таких, як грип, віспа, кір, краснуха, поліомієліт, сказ. Перший вірус — збудник чуми у рогатої худоби — був відкритий тим же російським ученим Гамалея за два роки до відкриття ним першого бактеріофага. Часточки одних вірусів в електронному мікроскопі мають вигляд кульок, інших — тонких і довгих паличок. Щодо людей, тварин і рослин віруси поводять себе цілком так само, як мікроби. Живі організми в свою чергу реагують на них, як на мікробів: у боротьбі з ними вони виробляють у собі «антитіла», згубні для даного виду вірусу, і, перенісши хворобу, набувають імунітету, тобто повторно цього захворювання не зазнають.

Але як у рослин під впливом особливих умов виникають мутації — нові стійкі різновидності, так і віруси можуть змінюватись і перетворюватись у нові види.

Природно, що лікарі поводяться з вірусами так само, як з мікробами. А хіміки поводяться з тими ж вірусами, як із найзвичайнішими речовинами: вони розчиняють їх, адсорбують, осаджують.

Отже, штучні білки, цукор і шовк з дерева, найтонші ароматичні речовини з продуктів розпаду і розкладу, що мають огидний запах, незліченні фарби і ліки з кам'яновугільної грязі — усе це не мрія і не казка. Це ява XX ст., результат невтомного дослідження будови молекул. І коли ми тепер запитуємо себе, що ж таке хімія, то хімія здається нам чарівним деревом з надзвичайно різноманітними плодами, які, проте, живляться одними і тими ж соками. Спрямувати ці соки у ту чи іншу гілку — залежить від людей. Від них залежить, чи буде хімія лікувати чи вбивати, поліпшувати харчові продукти чи фальсифікувати їх, здобрювати грунт, фарбувати тканини, рухати судна, прокладати тунелі... Хімія — це океан невичерпаних і невичерпних можливостей.

Перенесемося думкою на атомну електростанцію, на площадку запуску космічних ракет чи в цехи автоматизованого заводу. Усі ці чудеса сучасної техніки були б немислимі без хімії, без матеріалів, які створює вона за замовленням інженерів.

Хімія в поєднанні з соціалізмом — це високі врожаї, висока продуктивність праці, культура і добробут трудящих.

Довідковий відділ

Що читати з хімії

Мезенцев В. Загадка вещества (Из чего построен мир). М.—Л., Детгиз, 1951. 143 стор. з іл. (Шкільна бібліотека).

Книга розповідає про розвиток поглядів стародавніх філософів, алхіміків і вчених XVII—XVIII ст. на будову світу, живих і неживих тіл природи, а також про відкриття великих законів природи М. В. Ломоносовим і Д. І. Менделєєвим, про розгадку будови атомів і атомного ядра зарубіжними і радянськими ученими.

Степанов В. История великого закона. Изд. 3-е. М., Учпедгиз, 1957. 192 стор. з іл.

Книга Степанова — нариси з історії хімії. Автор показує, як відкритий Д. І. Менделєєвим періодичний закон і створена ним періодична система елементів вивели хімію з того тупика, в якому вона опинилась, будучи безсилою пояснити «безладну купу» несистематизованих фактів, нагромаджених наукою протягом багатьох віків.

Шаскольская М. П. Кристаллы. М., Гостехиздат, 1956. 228 стор. з іл.

Оповідання про те, як виникають кристали в природі, як їх вирощують у лабораторіях, як вони утворюються у виробничих процесах з розплавів, пари, при електролізі, які властивості вони мають, яка їх будова і як кристали служать людині. Відзначаються заслуги в науці видатного кристалографа Є С Федорова.

Джжур Б Путешественники-невидимки Рассказы об элементах. М., Детгиз, 1956 96 стор з іл.

Художні оповідання про елементи-близнята (метали натрій і калій), про елементи-солероди, дивну схожість в їх властивостях, про знаходження їх в природі у різноманітних хімічних сполуках, про відкриття їх ученими.

Розен Б. Семья солеродов. М., Детгиз, 1956, 160 стор. з іл. (Шкільна бібліотека).

Книга грунтовно знайомить з відкриттям, добуванням, властивостями і різноманітним застосуванням у різних галузях народного господарства галогенів — елементів VII групи, відзначає великі заслуги В. І. Вернадського, О. Є. Ферсмана, М. С. Курнакова у відкритті природних ресурсів найцінніших копалин, що містять ці елементи.

Андреева Е. и Андреев Ю. Огнем рожденное. Л., Детгиз, 1957. 208 стор. з іл.

Книга знайомить з цікавою історією російського скла і надзвичайно різноманітним застосуванням його в науці, техніці і побуті. Розповідається про видатних старовинних російських майстрів і перші склоробні заводи на території Росії, про роботи М. В. Ломоносова по мозаїці, про різні способи варіння скла, про різноманітне застосування силанів.

Данько Е. Китайский секрет. М., «Советская Россия», 1957. 159 стор. з іл.

Захоплююча повість про історію фарфору, про його майстрів, про трагічну долю творця російського фарфору Д. І. Виноградова і чудові досягнення радянських майстрів.

Тонин Ю. Как камень стал железным. Л., Детгиз, 1956. 160 стор. з іл. і кольоровими вкладками.

У своєрідній формі мандрівки з глибини віків у наші дні автор знайомить з історією винайдення бетону, цементу, із способами гартування бетону, з переходом у будівельній техніці до таких високоміцних матеріалів, як газобетон, залізобетон.

Мар Е. О простом железе. М., Детгиз, 1955, 72 стор. з іл.

Це історія подорожі куска залізної руди з місця її добування на збагачувальну фабрику, у доменний, мартенівський і прокатний цехи великого металургійного заводу з великою кількістю механізмів і контрольних приладів

Пешкин И. Как рождается сталь. М., Детгиз, 1955. 158 стор. з іл.

Книга Пешкіна ще глибше і ширше висвітлює питання, зачеплені у книзі Мара; перед читачем розкривається довга, протягом віків, історія виплавки заліза з руд, добування різноманітних за складом і властивостями залізних сплавів (чавуну, сталі), шлях вдосконалення металургійних процесів, зв'язаний з прославленими іменами вчених і майстрів-металургів.

Ключников Н. и Колодцев Я. Алюминий. М., Учпедгиз, 1958. 86 стор. з іл. (Бібліотека школяра).

Техніка, побут сучасного життя немислимі без алюмінію. Про цей метал, знаходження його в природі, добування, властивості, різноманітне застосування і розповідає книга. Автори розкривають винятково важливу роль сплавів і сполук алюмінію в техніці.

Фарадей М. История свечи. М., Детгиз, 1956. 112 стор. з іл. (Шкільна бібліотека).

Лекції Фарадея про процеси, зв'язані з горінням свічки, які він читав для дітей понад сто років тому і які викладені у цій книзі, не втрачають значення і в наші дні. Вони вчать спостерігати найзвичайніші явища, науково мислити, встановлювати єдність і взаємозв'язок в явищах природи і знаходити їх причини.

Ивич А. Обыкновенная лампа. М., Детгиз, 1957. 128 стор. з іл.

Книга примушує юного читача задуматись про багато речей і явищ, зв'язаних із звичайною лампою, що освітлює його стіл. «Потрібно,— говорить автор,— об'їхати країну, забратись під землю і під воду, щоб дізнатись, як працею тисяч людей і тисяч машин створювалась ця лампа». Це — оповідання про кам'яне вугілля, нафту, чавун і сталь, пластмаси, машини, верстати і електричний струм.

Жемчужников Ю. и Гор Г. Каменный уголь. М., Детгиз, 1956. 80 стор. з іл.

Книга популярно розповідає юним читачам про те величезне значення, якого набуло кам'яне вугілля у розвитку нашої соціалістичної промисловості, про способи його добування і переробки у рідке паливо і ряд найцінніших продуктів, що добуваються з кам'яновугільної смоли і відходів кам'яновугільного виробництва

Тихонравов Н. Рассказы о нефти. М., Детгиз, 1954. 240 стор. з іл. (Шкільна бібліотека).

Книга розповідає про чудові прилади, з допомогою яких провадять розвідування нафти, про нову техніку буріння, про широко застосовувані в нафтопереробній промисловості методи крекінгу, піролізу, каталітичної ароматизації нафти, про використання нафтопродуктів для виробництва синтетичного каучуку, пластмас, барвників, етилового спирту, оцтової кислоти, жирів та інших продуктів.

Розен Б. В мире больших молекул. М., Госкультпросветиздат, 1952. 206 стор. з іл.

Спочатку автор розповідає про будову речовини, основні закони хімії і структурну теорію Бутлерова, а далі про властивості і застосування штучних і синтетичних волокон, каучуку, різних пластмас, синтетичних клеїв, пінопластів, склопластиків і білків.

Реутов О. Органический синтез. Изд. 2-е. М., Гостехиздат, 1953. 64 стор. (Науково-популярна бібліотека, вип. 22).

Книга показує шляхи розвитку сучасного органічного синтезу на основі структурної теорії Бутлерова. Лаконічно, але точно описує суть виробничих процесів добування з вугілля, нафти і природних газів різноманітних синтетичних речовин: каучуку, пластмас, волокон, барвників, лікарських і запашних речовин, засобів боротьби з шкідниками рослин, стимуляторів росту та ін.

Петров Г. и Петрова Л. Пластмассы. М., Детгиз, 1953. 80 стор. з іл.

Автори знайомлять юних читачів з добуванням у промисловості штучних смол (методами варіння, лиття, гарячого пресування, формування), із застосуванням тисків і каталізаторів в автоматизованих процесах, з різноманітними галузями застосування всіх видів пластичних мас: в електро- і радіотехніці, в машинобудуванні і т. д.

Буянов А. Новые волокна. Изд. 2-е. М., Гостехиздат, 1953. 48 стор. з іл. (Науково-популярна бібліотека, вип. 55).

Автор розповідає про промислові основи виготовлення різних видів штучного шовку, синтетичного волокна із смол (капрон), скляного волокна, штучної шерсті.

Крючков А. Синтетический каучук. М., Учпедгиз, 1954. 112 стор. з іл. (Бібліотека школяра).

У книзі коротко розповідано про історію натурального і синтетичного каучуку, описано добування мономерів з етилового спирту, з газів нафтопереробки, з вугілля і вапна, з бензолу (стирол), а також добування синтетичного каучуку різними методами полімеризації. Порівнюються властивості різних каучуків, відзначено їх переваги і хиби.

Гродзенский Д. Атомная энергия — медицине. М., Гостехиздат, 1956. 72 стор. (Науково-популярна бібліотека, вип 90)

У вступі коротко розповідається про добування ізотопів елементів, про способи виявлення радіоактивного розпаду. Досить докладно сказано про дослідження обміну речовин в організмі з допомогою ізотопів (мічених атомів) і про використання ядерних випромінювань у розпізнаванні і лікуванні хвороб.

Морозов А. А. Михаил Васильевич Ломоносов. Изд. 2-е. М., «Молодая гвардия», 1955. 926 стор. (Життя визначних людей).

Книга Морозова являє собою фундаментальну працю—науково обгрунтовану біографію М. В. Ломоносова. В образі Ломоносова автор розкриває чудовий і запалюючий приклад великої російської людини, вченого, філософа-матеріаліста, найвідданішого патріота, що віддав свій геній, свої сили служінню

рідному народові, пристрасного борця за передову науку, проти неуцтва і мракобісся, основоположника сучасної хімічної науки.

Писаржевский О. Дмитрий Иванович Менделеев. Изд. 2-е. М., «Молодая гвардия», 1951. 464 стор. з іл. (Життя визначних людей).

У книзі про Д. І. Менделєєва авторові вдалося змалювати живий, яскравий образ великого вченого-новатора, корифея науки, палкого патріота. Геніальне відкриття Менделєєвим періодичного закону стало відкриттям світового значення, визначило новий етап у розвитку хімічної науки. Оцінюючи виховне значення цієї книги, акад. М. Д. Зелінський висловив побажання, щоб усі читачі її пам'ятали «заповітну думку» Д. І. Менделєєва, що праця є радість і повнота життя.

Гумилевский Л. Александр Михайлович Бутлеров. М., «Молодая гвардия», 1952. 336 стор. (Життя визначних людей).

У книзі наводяться докладні біографічні дані про О. М. Бутлерова, про створення ним теорії хімічної будови, яка позначила новий етап в розвитку органічної хімії і заклала основи самостійної російської школи хіміків-органіків. Значення структурної теорії органічних сполук ілюстроване великою кількістю прикладів з праць О. М. Бутлерова.

Парменов К. и Сморгонский Л. Книга для чтения по химии, ч. I. Изд. 2-е. М., Учпедгиз, 1955. 480 стор. з іл. і портр.

У першій частині книги юні хіміки знайдуть дуже цікавий матеріал з історії хімії від найдавніших її джерел до відкриття періодичного закону елементів. Книга охоплює великий матеріал з неорганічної хімії (крім металів).

Парменов К., Сморгонский Л. и Цветков Л. Книга для чтения по химии, ч. II. Изд. 2-е. М., Учпедгиз, 1956. 528 стор. з іл.

У зміст другої частини книги входять «Розчини», «Метали» і «Органічні сполуки». Ряд статей відображає успіхи сучасної хімічної науки і промисловості, зокрема в галузі добування синтетичних матеріалів.

Храпковский А. Занимательные очерки по химии. Л., Детгиз, 1958. 104 стор. з іл.

Ця книга дасть відповідь на багато питань, що цікавлять юних хіміків: про походження назв хімічних елементів, про поширення їх у природі, про різні властивості простих і складних хімічних речовин та про використання їх у нашому господарстві і в технології різних виробництв. Пояснено багато старовинних і образних назв.

Азимов И. Химические агенты жизни (перевод с английского). М., ИЛ, 1958. 135 стор. з іл.

Захоплюючі оповідання про «хімічне господарство» нашого організму — білки, ферменти, вітаміни, гормони.

Нейман М. Б. Радиоактивные изотопы и их применение. «Знание», 1959. 47 стор. з іл.

Лекція, що розглядає застосування радіоактивних ізотопів у різних галузях науки, техніки, сільського господарства і медицини.

Новая химия (перевод с английского). Изд-во Академии наук СССР, 1959. 208 стор. з іл. (Науково-популярна серія).

Збірник перекладних статей видатних американських учених, присвячений новим хімічним реакціям (високотемпературна хімія, вільні радикали та ін.), новим методам хімії (техніка досліджень мільйонними частками грама та ін.), новим хімічним елементам (синтетичні елементи і їх застосування) і новим сполукам (кремнійорганічні сполуки, фторовуглеці, синтетичні каучуки та ін.). Цікаво написані нариси розкривають останні досягнення науки, їх практичні застосування, перспективи дальших досліджень і доносять до читача романтику наукового шукання і схвильованість дослідника, який стоїть перед розгадкою нових таємниць природи.

Розен Б. Чудесные добавки. Детгиз, 1957. 143 стор.

У цікавій формі автор розповідає про мікродобрива, історію їх відкриття і роль у сільському господарстві.

Шпаусус З. Путешествие в мир химии (перевод с немецкого). Учпедгиз, 1959. 454 стор. з іл.

Оповідання про найбільш важливі хімічні елементи і їх сполуки, про хімічні теорії і закони, про застосування хімії в побуті і промисловості та про творців хімії.

Зорина Л. Юный химик. Описание 100 опытов по занимательной химии в быту. Изд. 2-е. МХП, 1958. 48 стор. з іл.

До цього посібника продається випущений Держхімзаводом ім. Войкова набір потрібних для цього реактивів, хімічного посуду та іншого приладдя. Юний хімік може своїми руками проробити ряд дуже цікавих дослідів по вирощуванню кристалів, по визначенню складу харчових продуктів, випробуванню властивостей багатьох інших речовин.

Фіалков Ю. Я. Оповідання з хімії. «Радянська школа», 1960, 107 стор., з іл.

Книга є збіркою цікавих нарисів з хімії, з її минулого, сучасного й майбутнього. Автор розповідає в ній про захоплюючу романтику повсякденної праці хіміка, історію деяких відкриттів, про створення елементів у лабораторії хіміка.

Горб Т. Ф. Хімія в минулому і тепер. «Радянська школа», 1959, 99 стор.

У книжці подані короткі відомості з історії хімії, про роль хімії в народному господарстві країни і в цьому зв'язку про полімери, рідкісні елементи, мічені атоми.

Покажчик імен і предметів

Авітамінóз — захворювання, що спричиняється недостачею в організмі тих чи інших вітамінів. Гостра форма авітамінозу може привести до смерті — 690

Адреналін — речовина з класу гормонів (див.), що виробляється надниркovими залозами — 686, 687

Адсóрбція — явище вбирання розчиненої або газоподібної речовини поверхнею твердого тіла чи рідини (адсорбента) — 575, 634

Акрилонітри́л — похідне акрилової кислоти $CH_2 = CHCOOH$, дуже добре полімеризується. Реакцію полімеризації його з бутадієном використовують для добування деяких сортів синтетичного каучуку, стійких до набрякання у поширених розчинниках, до нагрівання і старіння —665, 666

Активатори — див. Промóтори.

Алізари́н — один з найдавніших барвників, відомих людству. Довгий час добувався з кореня барвної рослини марени. У 1869 р. алізарин добуто синтетично з кам'яновугільної смоли — 681

Алхімія — середньовічна назва науки, метою якої у той період було головним чином перетворення неблагородних металів (міді, свинцю) у благородні (золото, срібло) з допомогою «філософського каменя» — 566

Амілаза — фермент, який сприяє розщепленню крохмалю; міститься у слині і соку підшлункової залози — 635, 636

Амінокислóти — речовини, з яких утворюються молекули білків. Назва амінокислот походить від наявності в їх молекулах аміногрупи NH_2 і карбоксильної групи COOH, завдяки чому амінокислоти мають одночасно і основні, і кислотні властивості — 675, 692

Анетóл — синтетична запашна речовина із запахом анісового масла; добувається з бензолу, вживається в медицині і парфюмерії — 685

Анілі́н — $C_6H_5NH_2$ — найбільш важливе похідне бензолу. Анілін є вихідним продуктом для виробництва різноманітних синтетичних барвників —682, 684

Антибіóтики — хімічні речовини, що утворюються мікроорганізмами і мають здатність пригнічувати ріст і навіть вбивати інші мікроорганізми і бактерії. До числа антибіотиків належать пеніцилін, стрептоміцин, граміцидин — 564

Антисéптики — хімічні речовини, що вбивають хвороботворних мікробів, застосовуються в медицині для дезинфекції, при лікуванні ран з метою знищення збудників хвороб, для консервування харчових продуктів, деревини і т. д.— 687

Асиметричний атом вуглецю — атом вуглецю у складі молекули, зв'язаний чотирма різними атомами чи різними атомними групами. Наявність асиметричного атома вуглецю обумовлює появу оптичної активності розчинів речовин — 652, 653, 691

Аспіри́н — жарознижуючий і болезаспокійливий засіб, похідне саліцилової кислоти — 689

Атомно-молекулярна теорія — вчення про переривчасту, зернисту будову матерії. Вже деякі стародавні філософи висловлювали погляди про атомістичну будову матерії, але вони обстоювали незмінність, неподільність атомів — 574, 575

Бакеліт — один з видів пластмаси, добутий конденсацією фенолу з формальдегідом. Бакеліт витримує досить високу температуру, стійкий до дії хімічних реактивів, чудовий електроізолятор — 657, 664

Бактеріофа́г — «пожирач бактерій». Бактеріофаги мають розміри молекул, і їх видно тільки з допомогою ультра- чи електронного мікроскопа. Бактеріофаг відіграє винятково важливу роль у боротьбі з хвороботворними, особливо кишковими, бактеріями. Тепер бактеріофаг виділено з рослинних об'єктів (морква, цибуля, часник, яблука) — 693, 694

Барбіту́рова кислота — синтетична органічна речовина, похідні якої застосовуються як снотворні засоби (див. Веронал і Люмінал) — 689

Ба́рвники — органічні сполуки (природні і синтетичні), що мають властивість при взаємодії з різними матеріалами закріплюватись на них, передаючи їм своє забарвлення — 683

Безполум'яне горіння — метод інтенсивного спалювання горючих газів. Коштом скорочення довжини полум'я процес горіння зосереджений на малій ділянці — 630, 632, 637

Білки — високомолекулярні органічні речовини, дуже складні молекули яких побудовані з амінокислот. Білки є основною складовою частиною живого організму і стоять у центрі обміну речовин — 564, 635, 656, 668, 671, 674, 675, 692

Бронза — сплав міді з різними металами (оловом, свинцем, алюмінієм, марганцем та ін.), один з перших сплавів, добутих людиною — 626

Ванілін — органічна запашна речовина, що міститься у плодах рослини ванілі, вживається у кондитерській справі і парфюмерії — 685

Верона́л — снотворний засіб, похідне барбітурової кислоти (див.), спричиняє сон середньої тривалості. У великих дозах може спричинити отруєння — 690

Вільні радикали — хімічні частинки, що утворюються в результаті відщеплення від молекул окремих атомів чи груп атомів. Мають одиничні електрони і відзначаються високою реакційною здатністю — 563, 640, 661.

Віруси — ультрамікроскопічні збудники інфекційних захворювань (від латинського «вірус» — отрута). Більшість вірусів проходить крізь фільтри, і тому вони називаються фільтрівними — 691, 694

Віскоза — в'язкий лужний розчин клітковини; продавлюючи його крізь спеціальні отвори в розчин кислоти, добувають нитки віскозного шовку (див. Штучний шовк). Віскозу використовують також для добування різних плівок — 670

Вітаміни — речовини, життєво потрібні організму, де вони містяться в мізерно малих кількостях і виконують роль своєрідних каталізаторів — 671, 688

Вулканізація — процес перетворення каучуку в гуму шляхом спільного нагрівання його з сіркою. Впровадження атомів сірки в молекули каучуку робить його більш міцним і твердим, стійкішим до коливань температури і дії різних агресивних середовищ — 657

Високоміцний чавун — чавун вторинної плавки з підвищеними показниками міцності — 625

Гексахлора́н (гексахлорциклогексан) — найважливіший синтетичний сільськогосподарський отрутохімікат. Застосовується у вигляді дусту — порошку, що складається з гексахлорану в суміші з наповнювачем (крейда, тальк та ін.) —652

Гемоглобі́н — барвна речовина крові, що виконує в організмі роль переносщика кисню — 682

Гербіци́ди — речовини, що вживаються для боротьби з бур'янами — 561

Германі́н — лікарська речовина емпіричної формули $C_{51}H_{40}O_{17}S_4N_6$, вживається при лікуванні сонної хвороби — 650

Гідрогенізація — реакція прилучення водню до різних сполук, що проходить під впливом каталізаторів (див.) — 674

Гідроліз — вид хімічної реакції між водою і розчиненою в ній речовиною — 672

Глюкоза (виноградний цукор) — $C_6H_{12}O_6$ — один з найпростіших представників класу вуглеводів, один з кінцевих продуктів складних перетворень, що їх зазнають в організмі складніші вуглеводи — 635, 672

Гормо́ни — особливі речовини, що виробляються в організмі залозами внутрішньої секреції — 564, 690

Декстри́ни — проміжні продукти гідролізу крохмалю на шляху перетворення його в глюкозу — 631, 635, 636, 672

Денатурація — необоротне зсідання білка, що відбувається при зміні температури, тиску, реакції середовища і т. д. — 636

Детонація — поширення виниклого перетворення (вибуху) на всю масу речовини або суміші. Детонація вибухових речовин утворюється при впливі полум'я, удару, тертя або ударної хвилі — 679

Друкарський мета́л — сплави різних кольорових металів, що вживаються для виготовлення друкарського шрифту, мають низьку температуру плавлення і добрі ливарні якості — 622

Евгено́л — синтетична запашна речовина (масло) із запахом гвоздики, добувається з різних ефірних масел, що містяться у рослинах, застосовується в парфюмерії — 685

Елементоорганічні сполуки — органічні сполуки, що містять, крім звичайних вуглецю, водню і кисню, інші елементи, наприклад магній, кремній, фосфор та ін. — 564

Елінва́р — пружний сплав, що містить хром, нікель і залізо. При зміні температури пружність елінвару майже не змінюється, вживають для виготовлення деталей різних приладів — 623

Енергія активації — найменша величина енергії, яку повинні мати реагуючі частинки, щоб реакція могла відбутись — 632, 638

Ензими — див. Ферменти.

Еозин — синтетичний барвник червоного кольору, який флуоресціює у розчині, забарвлює шерсть і шовк у червоний колір, але на практиці дуже нестійкий і в текстильній промисловості майже не вживається. З еозину роблять червоне чорнило—684

І

Ізомерія — явище однакового якісного і кількісного складу молекул різних речовин при різному просторовому розташуванні атомів всередині цих молекул — 576, 649

Ізомери — речовини однакового якісного і кількісного складу, які, проте, різняться своїми фізичними і хімічними властивостями внаслідок різного просторового положення атомів всередині їх молекул — 653

Ізопрен — леткий вуглеводень складу

$$CH_2=\overset{\displaystyle CH_3}{\overset{|}{C}}-CH=CH_2,$$

на основі якого вперше добуто було в лабораторії штучний каучук. Тепер ізопрен використовують для добування штучного каучуку в промисловому масштабі — 653, 657

Ізотактичні полімéри — полімери, бічні гілки яких розташовані всі по один бік від основного вуглецевого ланцюжка — 659

Інгібітор (корозії) — речовина, незначна добавка якої до корозійно-активного середовища сповільнює руйнування металів — 630, 641

Індиго — один з найстаровинніших барвників, відомих людині. Добувається з тропічного індигопосного чагарника. Індиго — чудовий кубовий барвник яскраво-синього кольору. Тепер індиго добувають синтетично з аніліну (див. Анілін) — 682, 683, 684

Індикатори — речовини, що змінюють своє забарвлення залежно від реакції середовища (кисла, лужна) — 613

Ініціатори — речовини, які збуджують, прискорюють реакцію. Від каталізаторів (див.) ініціатори відрізняються тим, що, беручи участь у реакції, вони самі при цьому витрачаються — 641, 659, 661

Інсектициди — отрутохімікати, що вживаються для боротьби з комахами — 561

К

Казеї́н — білок, що міститься в молоці. Казеїн можна виділити з молока при дії на нього кислотами. Казеїн міститься у сирі, має високу поживну цінність — 657, 676

Калорійність — кількість тепла, що виділяється в результаті згоряння даної речовини. Калорійність різних видів харчових продуктів визначається співвідношенням білків, жирів і вуглеводів, які входять до їх складу. При окисленні в організмі виділяється така кількість теплової енергії (в *ккал/г*): 1 *г* білка — 4,1; 1 *г* жиру — 9,3; 1 *г* вуглеводів — 4,1 — 676

Кам'яне вугілля — гірська порода рослинного походження, складається з відмерлих дерев і чагарників, що зазнали глибокого розкладу без доступу повітря під тиском шарів, що лежать вище, і при підвищеній температурі — 645, 677

Камфора — складна органічна речовина, що добувається з камфорного дерева і шалфею. Чудові лікувальні властивості цієї речовини відомі з далекої давнини. Камфора збуджує нервову систему, поліпшує роботу серця, регулює кров'яний тиск. Тепер камфору добувають і синтетично — 685, 686

Капрон — див. Синтетичні волокна.

Карболова кислота — див. Фенол.

Каталіз — процес зміни швидкості хімічної реакції (прискорення, сповільнення) під впливом особливих речовин — каталізаторів (див.) — 563, 629, 630

Каталізатори — речовини, що змінюють швидкість реакції (прискорюють чи сповільнюють її). Самі каталізатори при цьому не витрачаються і після закінчення реакції можуть бути виділені у тій же кількості — 629, 633, 636, 654

Каталізатори біологічні — див. Ферменти, Гормони, Вітаміни.

Каталітичні отрути — речовини, що отруюють каталізатор (див. Отруєння каталізатора) — 634

Каучук натуральний — речовина рослинного походження, що добувається з каучуконосних рослин: гевеї (Бразілія), гваюли (Мексіка), кок-сагизу тау-сагизу (СРСР) — 653, 664

Каучук синтетичний (СК) — речовини, що добуваються синтетичним способом, близькі за складом і властивостями до натурального каучуку (див.). Жодний з синтетичних каучуків не ідентичний з натуральним, але багато каучуків окремими якостями перевищують натуральний. В основі добування синтетичного каучуку лежить реакція полімеризації (див.) — 653, 657

Клітковина (целюлоза) — $(C_6H_{10}O_5)_n$ — полісахарид, кінцевим продуктом гідролізу клітковини є глюкоза (див.). Клітковина утворює основу багатьох рослин, формуючи стінки їх клітин — 656, 665, 670, 671, 677.

Ковкий чавун — особливий вид чавуну, що добувається способом спеціальної термічної обробки білого чавуну (див.). Ковкий чавун відзначається м'якістю і в'язкістю, знаходить застосування в різних галузях машинобудування, верстатобудування, будівництва і т. д. — 625

Коксування — промисловий метод переробки різних видів кам'яного вугілля способом нагрівання їх без доступу повітря. В результаті коксування утворюється: кокс, коксовий газ і кам'яновугільна смола — 654

Корозія — шкідливе поверхневе руйнування твердих тіл (головним чином металів) під дією різних фізико-хімічних впливів — 624, 628

Крекінг — процес розщеплення великих, важких молекул висококиплячих нафтопродуктів на легкі і

рухомі «осколки», що мають низьку температуру кипіння. Основна мета крекінгу — добування легкого моторного палива — бензину. Газоподібні продукти крекінгу використовуються в хімічній промисловості — 563, 678, 679

Кремнійорганічні смоли, мастила і емульсії — високомолекулярні хімічні сполуки, що добуваються способом гідролізу, конденсації (див.) і полімеризації (див.) кремнійорганічних мономерів (див.) — 665

Кремнійорганічні сполуки — хімічні сполуки, до складу молекул яких входять вуглець і кремній. Розрізняють низькомолекулярні (силани) і високомолекулярні (див. Кремнійорганічні смоли і т. д.). Кремнійорганічні сполуки, що містять кисень, так само як і вуглеводні, мають нахил до полімеризації — 666

Крохмаль — суміш полісахаридів загальної формули $(C_6H_{10}O_5)_n$. При повному гідролізі крохмалю утворюється глюкоза (див.). Крохмаль міститься у багатьох рослинах і є першим продуктом фотосинтезу — 630, 635, 671

Кумарин — органічна речовина, що міститься в багатьох рослинах, має запах свіжоскошеного сіна. Тепер кумарин добувають синтетично і широко застосовують як запашну речовину в парфюмерній, харчовій промисловості, при ароматизації тютюну — 685

Лаки — рідини різного хімічного складу, які наносять тонким шаром на предмети і які утворюють при висиханні тверді плівки — 657

Ланцюгові реакції — хімічні і ядерні реакції, що виникають під дією активної частинки (вільного радикала, або нейтрона), яка спричиняє велику кількість (ланцюг) перетворень внаслідок «відродження» активної частинки у кожній окремій ланці реакції — 563, 639, 640

Латунь — сплав міді з цинком. Латунь стійкіша проти атмосферних впливів, ніж, наприклад, залізо — 620

Леговані сталі — спеціальні сорти сталі, в які, крім звичайних складових елементів, входять особливі легуючі матеріали. Легування дозволяє добувати сталі з потрібними властивостями — 623, 626

Ліпаза — фермент, що міститься в соку підшлункової залози і розкладає складні молекули жирів на гліцерин і жирні кислоти, які легко засвоюються організмом — 635, 674

Люмінал — снотворний засіб, похідне барбітурової кислоти (див.), спричиняє глибокий тривалий сон. У великих дозах люмінал спричиняє отруєння і навіть смерть — 690

Магнієві сплави — сплави, основним елементом яких є магній. Найбільше застосування мають сплави магнію з алюмінієм, цинком і марганцем. Магнієві сплави відзначаються легкістю і високими механічними властивостями, знаходять застосування в авіаційній, автомобільній промисловості, електропромисловості і т. д. — 627.

Маргарин — харчовий жир, що виготовляється із суміші рослинних і тваринних жирів, молока та інших складових частин (барвники, ароматизатори) — 674

Мастила — органічні продукти різного складу і походження. Добувають їх головним чином при переробці нафти і широко використовують для мастіння тертьових частин машин, шарикопідшипників, для захисту від корозії різних металевих виробів і т. д. — 655

Мельхіор — сплав міді з нікелем, сріблясто-білого кольору, стійкий проти корозії — 620

Ментол — органічна запашна речовина із запахом м'яти, міститься у маслі м'яти; синтетично ментол добувають з бензолу і його похідних; він знаходить застосування у медицині і парфюмерії — 685

Мікроелементи — елементи життєво необхідні або корисні для рослинних і тваринних організмів, але потрібні в мінімальних кількостях. До числа мікроелементів належать: мідь, марганець, бор, цинк, молібден, кобальт та ін. — 612

Модифікатори — спеціальні добавки, що змінюють структуру сплавів, отже, і їх властивості. Як модифікатори вживають: магній, титан, ванадій, хром та ін., застосовуються при виплавці різних сортів чавуну і сталі — 625

Мономери — прості молекули, «цеглинки», з яких складаються молекули полімерів (див.) — 656

Мускон — речовина, яка зумовлює запах природного мускусу, міститься в ньому в кількості до 1%, входить до складу багатьох дорогих духів — 686

Мускус — природна запашна речовина, яку добувають із залози самця кабарги — дикої тварини з породи кіз. Мускус міститься також у корінні деяких рослин — 686

Нафта — складна суміш вуглеводнів різного складу з домішкою сірчистих і азотистих сполук. Нафта є викопною горючою речовиною і використовується як паливо. При переробці нафти добувають цілий ряд цінних хімічних продуктів: барвники, смоли, лікарські речовини, будівельні матеріали і т. д.— 561, 632, 654, 677

Найлон — див. Синтетичні волокна.

Нержавіюча сталь — спеціальна сталь, стійка проти атмосферної і водної корозії (див.). Нержавіюча сталь знаходить широке застосування в авіа-, авто- і верстатобудуванні — 620

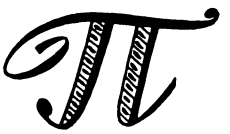
Нікотин — інсектицид рослинного походження, міститься в листі і насінні тютюну, належить до класу алкалоїдів, виявляє токсичну дію, попадаючи на зовнішні покриви комахи, застосовується для боротьби з шкідниками сільського господарства. Нікотин сильно впливає на організм, спричиняючи у малих дозах збудження, а у великих — параліч і навіть смерть — 652

Ніхром — сплав нікелю і хрому з невеликою домішкою інших елементів. Ніхром відзначається високою жаростійкістю (до 1200°) і електричним опором, тому знаходить застосування у виробництві нагрівальних приладів — 623

Октанове число — одиниця виміру антидетонаційних (див. Детонація) властивостей моторного палива. Одним з найбільш детонаційно стійких вуглеводнів є ізооктан, стійкість його прийнято за 100. За нуль прийнято детонаційну стійкість Н-гептану —679

Оптична ізомерія — вид просторової ізомерії, що спостерігається у деяких органічних речовин і складних неорганічних сполук. Оптична ізомерія виявляється в оптичній активності сполук, тобто в здатності відхиляти площину поляризації світлового променя вправо або вліво. Оптично ізомерними є речовини, що містять асиметричний атом вуглецю — 652

Отруєння каталізатора — зниження або повне знищення каталітичної активності в результаті впливу деяких речовин — каталітичних отрут — 634



Парафін — суміш різних вуглеводнів з дуже довгими вуглецевими ланцюгами (до 100 атомів вуглецю), що виділяється з природної нафти. Парафін — біла, напівпрозора речовина, м'яка і легкоплавка — знаходить застосування в медицині (парафінові ванни, мазі), парфюмерії і т. д. — 654

ПАСК — протитуберкульозний препарат, похідне саліцилової кислоти (див.) — 689

Пепсин — фермент, що сприяє розщепленню складних молекул білків на простіші молекули амінокислот (див.), які засвоюються організмом. Пепсин міститься у шлунковому соку — 635, 675, 677

Перлон — див. Синтетичні волокна

Плазмохін — синтетичний протималярійний препарат— 688

Плазмоцид — синтетичний протималярійний препарат, у великих дозах спричиняє отруєння — 688

Пластеїни — білковоподібні речовини, синтезовані з допомогою ферментів із продуктів гідролізу білка. Пластеїни дуже складні і мають молекулярну вагу до 6000— 677

Пластмаси — дуже складні синтетичні речовини, що добуваються на основі природних і синтетичних смол, білкових речовин, ефірів, целюлози і т. д. — 628, 632, 654, 657

Платиніт — сплав заліза з нікелем, має коефіцієнт об'ємного розширення, однаковий з платиною (звідси назва) і склом. Застосовується як провідник, що його впаюють в скло при виготовленні різних приладів — 620, 623

Плексиглас (поліметилметакрилат) — безбарвна прозора пластмаса, органічне скло, вживається у техніці і будівництві для різних цілей — 662

Побєдіт — сплав карбіду вольфраму з нікелем, що добувається спіканням їх порошків під тиском, відзначається великою твердістю і знаходить застосування головним чином при виготовленні гірничорудного і металообробного інструментів — 627

Поліаміди (поліамідні смоли) — синтетичні смоли, що добуваються реакцією поліконденсації амінокислот, карбонових кислот та інших продуктів. Поліаміди характеризуються волокнистою будовою і широко використовуються у виробництві синтетичних волокон — 661

Поліамідні волокна — синтетичні волокна (див.), що добуваються з поліамідних смол. Відзначаються міцністю, водостійкістю, стійкістю проти процесів гниття — 664

Полівінілхлорид — синтетична смола, що добувається полімеризацією хлористого вінілу, використовується у виробництві пластмас, які вживають для виготовлення труб, ізоляторів, деталей хімічної апаратури і т. д. — 661

Поліетилен (політен) — (— CH_2 — CH_2)x — високомолекулярна синтетична речовина, добута полімеризацією етилену (CH_2=CH_2). Надзвичайно різноманітне і широке застосування поліетилену (електроізоляція, хімічно стійкі покриття, синтетичні волокна, пластмаси, плівки та ін.) завоювало йому безперечне право називатися «королем пластмас» — 654, 658, 661

Поліефіри — синтетичні смоли, добуті полімеризацією двоосновних кислот з гліколями, що використовуються у виробництві синтетичних волокон великої міцності — 661

Полікарбонати — синтетичні смоли, добуті взаємодією вугільної кислоти з фенолами, характеризуються високою теплостійкістю — 661

Поліконденсація — процес сполучення відносно простих вихідних речовин (однакових і різних) у складні молекули полімерів. Поліконденсація супроводиться виділенням простих молекул (води, аміаку і т. д.) — 660

Полімеризація — процес сполучення простих молекул «мономерів» (див.) у великі, складні «полімери». Цей процес проходить при наявності у простих молекулах неміцних подвійних зв'язків, які, розмикаючись, сполучаються одна з одною у довгі ланцюжки полімерів. Процес полімеризації не супроводиться виділенням будь-яких побічних продуктів реакції — 563, 653, 657, 659

Полімери (високомолекулярні речовини) — речовини, що складаються з великої кількості порівняно простих ланок. Синтетичним шляхом добуто полімери із заздалегідь заданими властивостями, яких не зустрічається у живій природі — 653, 659, 663, 664

Полістирол — синтетична смола, що має термопластичні властивості, добре формується, має механічну міцність, електроізоляційні властивості, хімічно стійка — 661, 662, 665

Припій — сплави різного складу, що застосовуються при паянні для заповнення зазорів між деталями — 620, 622

Присадки — речовини, що добавляються у невеликих кількостях до мастил і моторних палив з метою поліпшення їх властивостей. У металургії присадки вводять в плавильну піч для надання потрібних властивостей виплавлюваному металу або шлаку—624

Промо́тори — посилювачі, речовини, додавання яких у невеликих кількостях підвищує активність каталізатора (див.). Самі промотори активності не мають і виявляють ці якості тільки в суміші з каталізаторами. Як промотори вживають різні окисли, гідрати окислів, кислоти, солі — 632

Птиалін — фермент, що міститься у слині, сприяє початковому роздробленню великих молекул крохмалю на дрібніші складові частини — 672

Пу́рпур — дуже стійкий органічний барвник, яскравочервоного кольору, який добували з молюска «мурексу», що живе у південних морях.

Тепер синтезовано штучний пурпур, який красотою і міцністю навіть перевищує природний — 681, 684

Р

Ростові речовини — природні і синтетичні речовини, які прискорюють чи сповільнюють ріст рослин і сприяють достиганню плодів — 561

С

Саліцилова кислота — лікарська речовина, що добувається з багатьох рослин, чудовий засіб проти ревматизму. Тепер саліцилову кислоту добувають синтетичним способом з фенолу. Багато похідних саліцилової кислоти теж є цінними лікарськими речовинами — 689

Салол — кишечнодезинфікуюча речовина, похідне саліцилової кислоти — 689

Сахароза (буряковий або тростинний цукор) — $C_{12}H_{22}O_{11}$ — один з представників класу вуглеводів — 673

Селективність — вибірність, найкраще виділення з усієї сукупності можливих напрямів перебігу реакції одного певного напряму — 632

Сечовина — $CO(NH_2)_2$ — речовина, що міститься у сечі тварин і людини. Цю органічну речовину в 1828 р. вперше синтезував з неорганічних речовин німецький хімік Велер. Це підтвердило відсутність різкої границі між органічними і неорганічними речовинами — 645, 676

Силіконові фарби, лаки, гума (силікони) — кремнійорганічні речовини, у нитковидних молекулах яких чергуються кремній і кисень. Усі силікони відзначаються високою теплостійкістю і використовуються для виготовлення виробів, що зазнають впливу високих температур — 666

Силон — див. Синтетичні волокна.

Синтетичні волокна (капрон, перлон, силон, найлон, нітрон, лавсан та ін.) добувають з різних синтетичних смол, сировиною для яких у свою чергу служать кам'яне вугілля, нафта, вода і т. д. Синтетичні волокна відзначаються великою міцністю (капрон 75 *кг/мм*^{2} при товщині нитки до 0,01 *мм*), хімічною стійкістю, водостійкістю і стійкістю проти впливу мікроорганізмів — 661

Синти́н — суміш різних вуглеводнів, що добуваються синтезом з окису вуглецю і водню. Окислення синтину при високій температурі в присутності каталізаторів приводить до утворення жирних кислот. Синтин використовують як рідке паливо— 677

Сірий чавун — вид чавуну, характерною особливістю якого є наявність у структурі зерен графіту, що надають чавуну характерного сірого кольору; вживається для відливання деталей машин — 624, 625

Сталь — сплав заліза з вуглецем змінного складу — 623, 624, 626

Сульфаніламідні препарати — лікарські речовини, що добуваються із сульфанілової кислоти — 688

Т

Термічна обробка — сукупність процесів нагрівання, витримування при певній температурі і охолодження металів і їх сплавів. В результаті термічної обробки змінюється внутрішня будова оброблюваної речовини, отже, і її властивості — 626

Терпени — клас органічних сполук загальної формули $C_{10}H_{16}$, які зумовлюють аромат рослин. Здебільшого — це леткі, легкорухливі рідини; дуже багато терпенів міститься у лимонах, апельсинах, кмині, камфорному дереві і т. д. Терпени знаходять широке застосування в медицині, парфюмерії, кондитерській справі — 685

Терпінеол — синтетична запашна речовина із запахом бузку, що добувається з скипидару, який в свою чергу міститься у смолистих виділеннях сосен. Терпінеол вживається в парфюмерії — 685

Тефлон (фторопласт) — синтетична високомолекулярна речовина, продукт полімеризації тетрафтороетилену $F_2C = CF_2$, відзначається високою стійкістю проти дії концентрованих кислот, лугів і різних розчинників — 662

Тимол — органічна ароматична сполука, що міститься у різних рослинах, має бактерицидні властивості і використовується як антисептик — 685

Тироксин — гормон (див.), що виробляється щитовидною залозою, підвищує основний обмін. Внаслідок поганої розчинності тироксин не має особливої цінності як лікувальний препарат — 687

Титанові сплави — сплави, основу яких становить титан. Титанові сплави відзначаються високою міцністю, стійкістю проти корозії, широко вживаються в авіації, суднобудуванні, танкобудуванні, атомній промисловості і т. д. — 627

Тол (тротил) — вибухова речовина, що добувається нітруванням толуолу (див.), має широке воєнне і мирне застосування — 680

Третник — сплав 62% олова і 38% свинцю, що вживається як припій — 622.

Трипсин — фермент, що сприяє розщепленню складних молекул білкових речовин до простіших молекул амінокислот (див.), які засвоюються організмом — 636, 675

«Тріади» Доберейнера — природні сімейства хімічних елементів, запропоновані німецьким хіміком Доберейнером у 1829 р.— 575

Тротил — див. Тол.

У

Уротропін — лікарський препарат. Формальдегід, що утворюється при його розпаді, має бактерицидні властивості. В техніці уротропін використовують як інгібітор (див.) кислотної корозії заліза — 630

Ф

Фенол (карболова кислота — C_6H_5OH) — продукт перегонки кам'яновугільної смоли. Це прозорі кристали, що мають властивість вбивати мікробів (антисептик). Фенол використовують для виробництва численних лікарських речовин, барвників, синтетичних смол і волокон — 657, 684

Ферменти —органічні каталізатори, що прискорюють або сповільнюють біологічні процеси в живих організмах. Ферменти виробляються самим організмом. Вплив ферментів залежить від температури, реакції середовища і наявності активаторів (див.) і інгібіторів (див.) — 635, 672, 677

Флогістон — на думку алхіміків, особливе горюче начало, що міститься у речовинах і виділяється з них при прожарюванні — 572

Флуоресцеїн — представник трифенілметанових барвників, названий так через властивість флуоресціювати (тобто світитися) в лужних розчинах. Розчини флуоресцеїну мають жовто-зелений колір, шерсть і шовк флуоресцеїн забарвлює у жовтий колір — 684

Фотохімічні реакції — реакції, що проходять при діянні світла — 638

Фруктоза — ($C_6H_{12}O_6$) — найпростіший представник класу вуглеводів, є кінцевим продуктом гідролізу сахарози (див.), міститься у різних плодах, фруктах і меді — 673, 677

Х

Хінін —лікарська речовина, що добувається з кори хінного дерева, яке росте в Америці. Хінін — чудовий засіб проти малярії. Тепер хінін добуто синтетичним способом і, крім того, на основі молекули хініну синтезовано інші, не менш дійові протималярійні препарати — 687

Хлорофіл — барвна речовина рослини, що надає їй зеленого кольору. Для утворення хлорофілу потрібне нормальне мінеральне живлення, кисень і світло. З хімічного погляду хлорофіл є складною магнійорганічною сполукою — 673, 682

Хромофор — носій забарвлення, атоми і атомні сполучення зв'язані подвійним зв'язком, що надають органічним сполукам певного кольору — 683

Ц

Цементит — хімічна сполука заліза з вуглецем, карбід заліза Fe_3C — складова структури чавунів і сталей — 625

Целюлоза — див. Клітковина.

Цибет — природна запашна речовина, що добувається із залоз хижих ссавців, африканських цивет (тварини з породи кішок). Цибет має запах мускусу, вживається в парфюмерії — 686

Цибетон — речовина, що надає своєрідного запаху цибету — 686

Ч

Чавун — сплав заліза з вуглецем (понад 2% вуглецю). До складу чавуну входять також кремній, марганець, сірка і фосфор. З чавуну добувають сталь, видаляючи з нього частину вуглецю — 623, 624

Ш

Штучний шовк — шовк, добутий обробкою різними хімічними реагентами природної клітковини (бавовна, деревина). Залежно від застосовуваного реагенту розрізняють нітрошовк, мідноаміачний, віскозний і ацетатний шовк — 669, 670

Я

Ятрохімія — медична хімія. Напрям у хімії, створений Парацельсом (XVI ст.), який головним завданням хімії вважав шукання і виготовлення неорганічних лікувальних препаратів — 570, 574

Умовні позначення і скорочення

СКОРОЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ТЕРМІНІВ

Å — ангстрем
а — ампер
а-г — ампер-година
в — вольт
вт — ват
Г — грам-сила
г — грам-маса
*Г/см*³ — грам на кубічний сантиметр (питома вага)
*г/см*³ — грам на кубічний сантиметр (густина)
гц — герц
дж — джоуль
дин — дина
кал — калорія
квт — кіловат
квт-г — кіловат-година
кГ — кілограм-сила
кг — кілограм-маса
*кГ/м*³ — кілограм на кубічний метр (питома вага)
*кг/м*³ — кілограм на кубічний метр (густина)
кГм/сек — кілограмометр за секунду
кгц — кілогерц
ккал — кілокалорія
л — літр
к. с. — кінська сила
м — метр
*м*³ — кубічний метр
Мгц — мегагерц (1 000 000 *гц*)
мк — мікрон (0,000 001 *м*)
мм — міліметр
ммк — мілімікрон (0.000 000 001 *м*)
мксек — мікросекунда (0,000 001 *сек*)
мм рт. ст. — міліметр ртутного стовпа
мсек — мілісекунда (0,001 сек)
м/сек — метр за секунду
*м/сек*² — метр за секунду в квадраті
Мев — мегаелектроновольт
мол. в. — молекулярна вага
об/хв — оберт за хвилину
ом — ом
см — сантиметр
*см*³ — кубічний сантиметр
см/сек — сантиметр за секунду
*см/сек*² — сантиметр за секунду в квадраті
темп. абс. — температура абсолютна
темп. крит. ($T_{кр}$, $t_{кр}$) — температура критична
ев — електроновольт
е. р. с. — електрорушійна сила

Художнє оформлення *С. М. Пожарського*

Рисовані заставки *К. К. Соколова*
Рисунки до змісту *Н. І. Гришина*
Головний художник *А. І. Гангалюк*

Ілюстрації і схеми виконали художники:

АВОТІН Р. Ж., АЛІМОВ Б. А., АРЦЕУЛОВ К. К., БАРИШНИКОВА С. Н., БЕДАРЬОВ Г. К., БІРЮКОВ А. П., БОРИСОВ Е. С., ВЕНДРОВ Л. С., ВЕЧКАНОВ Н. К., ВОЛКОВ С. Н., ГРИШИН Н. І., ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ В. Н., ДОЛМАТОВ В. А., ЗАЛЬЦМАН Ю. І., КАПЛАН С. І., КОРОТКОВА Є. А., КИСЕЛЕВИЧ М. Д., ЛЕБЕДЄВ А. Н., МАЛИШЕВ Б. А., НАУМОВ С. Г., НЕВЕЛЬСОН Е. Г., ПЕТРОВ А. В., РУСАКОВ С. К., СЕМИГІН В. Д., СОКОЛОВ К. К.

* * *

Редактори
Г. Д. Коперсак, А. Н. Карнаух,
М. Я. Коваленко

Художній редактор *Н. О. Горбачова*
Технічний редактор *Н. К. Волкова*
Коректор *Г. В. Соноцька*

ДЕТСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ, т. 3

(на украинском языке)

Государственное учебно-педагогическое издательство
«Радянська школа»

Здано до набору 13/VI 1961 р. Підписано до друку 16/I 1962 р.
Папір 84×108¹/₁₆. Фіз. друк арк. 44,25+27 вкл., умовн. арк.
72,57+6,56 вкл., видавн арк. 77,7+10,1 вкл. Тираж 35.000.
Ціна 2 крб 80 коп. Зам № 1-1039.

Державне учбово-педагогічне видавництво
«Радянська школа»
Київ, вул. Юрія Коцюбинського, 5. Видавн № 12357.

Книжкова фабрика ім Фрунзе Головполіграфвидаву
Міністерства культури УРСР
Харків. Донець-Захаржевська, 6/8.